



DISEÑO DE LA ILUMINACIÓN DE ESTADO SÓLIDO (SSL)

Alumno: Héctor Martín Amo

Director: Abelardo Martínez Iturbe

Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Máster Universitario en Ingeniería Electrónica

Trabajo Fin de Máster

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Septiembre de 2011

Índice

	<u>Pág</u>
Presentación	5
LED como fuente de luz	9
1.1 Características generales	9
1.2 Características eléctricas y configuración de conexionado	15
1.3 Pérdidas en el LED y eficiencia real	18
1.4 Degradación de un LED	20
1.5 Beneficios y futuro del LED	21
Alimentación para la iluminación de estado sólido	23
2.1 Introducción	23
2.2 Normativa aplicable al diseño	24
2.3 Configuraciones para realizar la alimentación	25
2.3.1 Convertidor AC-DC flyback en modo de corriente constante	26
2.3.2 Convertidor AC-DC alimentando a convertidor DC-DC de I constante	27
2.3.3 Convertidor AC-DC flyback específico para aplicaciones LEDs	29
Conclusiones	33
Referencias	37
Anexo I	39
Diseño de la fuente de corriente constante AC-DC tipo flyback para LED	
Anexo II	44
Diseño del driver DC-DC de corriente constante alimentado con tensión continua	
Anexo III	46
Diseño del convertidor AC-DC específico para LEDs	

*Agradecimientos a Oscar y Álvaro
de Arrow Iberia, Héctor de
Eurotronix, Jordi de Troll, a mi
director Abelardo y sobre todo a
mi mujer Carolina.*

Presentación

Desde que a finales de los años 90 se desarrolló el primer dispositivo de estado sólido para iluminación de alta potencia, cuando Luxeon comercializó el diodo LED de 1W (fabricado con mezcla de Nitruro de Galio y Nitruro de Indio, InGaN) con un rendimiento de 35Lm/W, la carrera de los fabricantes por conseguir la mayor cantidad de lúmen por watio (Lm/W, es una medida de la eficacia de una fuente de luz en términos de lúmenes por potencia consumida) ha evolucionado considerablemente llegando a conseguir actualmente los 130 Lm/W, con la meta de llegar a los 160 Lm/W a unos precios atractivos. Teniendo en cuenta que el nacimiento de este componente en el campo de la iluminación tenía un coste de 15 € por watio (es la jerga empleada en el marketing de este componente) y que actualmente ha disminuido a 1€ por watio con un rendimiento muy superior, se está convirtiendo en el perfecto aliado para el sector de la iluminación. Además, se ha introducido en la iluminación profesional-doméstica con la sustitución de todos los tipos de lámparas existentes en el mercado -lámparas retrofit-, hasta los nuevos diseños de luminarias LEDs; en el sector de la automoción se ha observado el mismo efecto, por lo que el coste se está reduciendo rápidamente debido a la gran demanda.

Las principales ventajas de este componente frente a las actuales fuentes de iluminación (lámparas de descarga, halógena, incandescente, fluorescencia, etc.) son la durabilidad, robustez, configuración en el diseño, aplicaciones y, sobre todo, ahorro de energía, además según un informe de la empresa CREE, son más eficientes que las actuales lámparas fluorescentes CFL [1].

Otra característica que refuerza el uso del diodo como fuente de luz es el valor del **CRI** (Índice de Rendimiento del Color) que sirve para describir el efecto de una fuente de luz en la apariencia de los objetos, en comparación con una fuente de referencia de la misma temperatura de color, CCT (Correlación de Temperatura de Color), es decir, cuantifica lo fielmente que una fuente de luz reproduce los colores. Una fuente de luz con $CRI < 70$ no se considera aceptable para aplicaciones en iluminación de interiores. Los LEDs de potencia para iluminación tienen un CRI de 80 a

90 y con el avance de la tecnología éste va aumentando. El CRI siempre presenta un compromiso con la eficiencia.

En la tabla 1 se pueden observar las diferencias entre las distintas fuentes de luz actuales respecto a las características más importantes en el funcionamiento de la lámpara, Lm/W, CRI y la vida útil dada en horas (K son miles de horas):

Tipo de luz	Lm/W	CRI	Vida (hrs)
Lámpara incandescente	8-15	100	3 K
Lámpara halógena	16-22	100	10 K
LED estándar (blanco cálido)	60-85	>90	50 K*
LED LUXEON® Rebel (blanco frío)	80-120	70-80	50 K*
Tubo fluorescente T8	58-89	75-85	20 K
Lámpara de halogenuro metálico	60-80	70	5K - 15 K
Lámpara de alta presión de sodio	57-125	22	16K - 24 K
Lámpara de baja presión de sodio	68-173	5	16K - 18 K

Tabla 1. Diferencias entre las distintas fuentes de luz. Datos obtenidos de distintos catálogos de lámparas.

* A las 50.000 horas el flujo se deprecia un 30%. Si no hay una buena disipación de calor en el componente, la vida se reduce notablemente.

Actualmente, la tecnología LED está abarcando terreno en el mercado de la iluminación y según un informe del 28/06/2011 de ANFALUM (Asociación de Fabricantes de Luminarias) el 60% de las luminarias serán LEDs en 2020. El mercado actual con pequeños presupuestos y poca formación en eficiencia energética valoran poco esta tecnología, ya que su precio es mucho mayor que las luminarias con otro tipo de lámparas, pero hay que tener en cuenta que su mantenimiento es mucho menor, por lo que su durabilidad y ahorro en el consumo eléctrico compensan la elección. Se prevé que el mercado valore y considere esta gran alternativa de iluminación y también que,

gracias a las empresas dedicadas al negocio de la eficiencia energética, se promueva el consumo de la iluminación de estado sólido.

Después de esta introducción para disertar sobre la valía de los LEDs y ratificar su elección en iluminación, el primer objetivo de este proyecto es conocer y definir dichos diodos. En segundo lugar, se expone el estudio del suministro de la potencia necesaria para alimentar a estos componentes, llamados comercialmente “Driver o Fuente de alimentación para LEDs”. En concreto, se van a estudiar las posibles configuraciones de los equipos que proporcionan una corriente constante para asegurar el mismo brillo en todos los diodos de una misma superficie o luminaria. También se tendrán en cuenta las pérdidas del LED frente a la temperatura de unión y, sobre todo, cómo puede aumentar su efectividad con una buena disipación del calor.

Como valor añadido a la relevancia de los objetivos planteados, el diseño de estos alimentadores también es válido para la nueva tecnología WOLED (LED Organic White), unos dispositivos similares a una resistencia en cuanto a su comportamiento eléctrico. Se prevé que a finales de 2012 comience la comercialización de estos últimos en el sector de la iluminación, por atribuírseles un mayor rendimiento, mejor configuración de diseño y menor generación de calor que en los LEDs.

LED como fuente de luz

1.1 Características generales

Como cualquier otro diodo, el LED es un componente semiconductor de InGaN (mezcla de Nitruro de Galio y Nitruro de Indio) para los colores fríos y de AlInGaP (Fosforo de Galio Indio Aluminio) para los cálidos, que crea un campo eléctrico debido al potencial de tensión. En la figura 1 se representan ambas tecnologías en el diagrama cromático xy de CIE 1931 (Commission Internationale de l'Eclairage, Comisión Internacional de Iluminación).

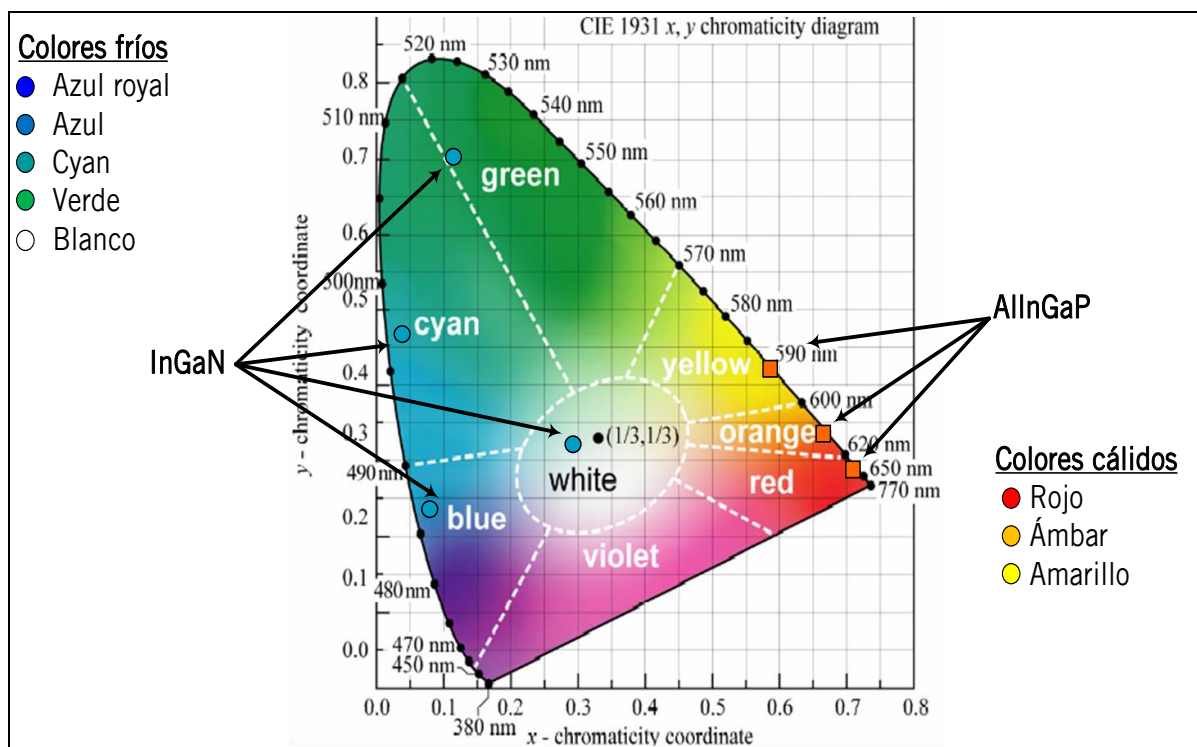


Figura 1. Representación de las tecnologías citadas en el diagrama cromático.

Los fotones emitidos por alguna de las recombinaciones en la misma región del semiconductor, al estar los electrones y huecos en la misma región en un rango de frecuencia muy estrecho, dependen del material del chip, el cual a su vez está relacionado con la longitud de onda determinando el color de la luz radiada. Además,

en el diagrama cromático de la figura 1 se pueden apreciar las longitudes de onda de algunos colores.

Los chips más empleados en iluminación son los de color blanco, tanto el blanco frío de una temperatura de 6000° Kelvin como el cálido de unos 4500°K. Cuanto más baja es la temperatura de color, mejor será el CRI del LED. Para iluminación arquitectónica y decoración de interiores se emplean chips RGB (Blue, Green, Red) que están compuestos por los colores Azul, Verde y Rojo en el mismo encapsulado y son controlados para emitir toda la gama de posibles combinaciones de colores. Suelen tener tres ánodos y un cátodo común y su control se realiza con un sistema llamado DMX.

Por otro lado, en la figura 2 se detallan las partes principales del LED de potencia y algunos de los encapsulados actuales existentes en el mercado. Los principales fabricantes son CREE, Lumileds (Philips Luxeon), OSRAM y Seoul.



Figura 2. Partes de un diodo LED de potencia y encapsulados.

Otra característica a tener en cuenta es el binning (código BIN) que incluye la cantidad de flujo luminoso y la longitud de onda del LED. Este código se define mediante el proceso de clasificación de los LEDs en distintos tipos de flujo, color y caída de tensión para asegurar la uniformidad del componente, garantizándose así la repetitividad del producto. Normalmente, los fabricantes de LEDs no ofrecen la posibilidad de seleccionar un único BIN de color, sino que esta tarea es del distribuidor.

Últimamente los principales fabricantes están adoptando la estructura de bins ANSI (ANSI NEMA ANSLG C78.377-2008 American National Standard for Electric Lamps-Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products). [2]

También es muy importante en los LEDs de potencia la temperatura de unión del componente (T_j) pero ésta no puede ser medida directamente porque está dentro del propio LED, en la unión del chip con el propio sustrato cerámico que tiene debajo. En la figura 3 se observa la T_j en función del flujo luminoso y cómo **disminuye conforme aumenta dicha temperatura**. Por eso es importante realizar una buena disipación de T_j para mantener estable el flujo luminoso.

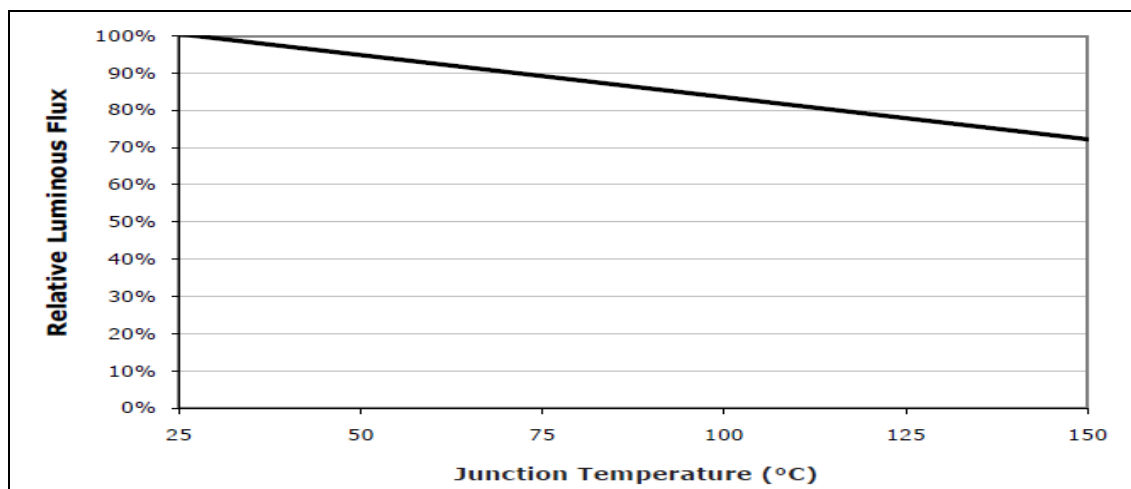


Figura 3. Flujo luminoso en función de la temperatura de unión (XP-G de CREE).

Además, la corriente máxima a la que podrá trabajar el LED sin llegar a destruirse también depende de T_j , como se puede observar en la figura 4.

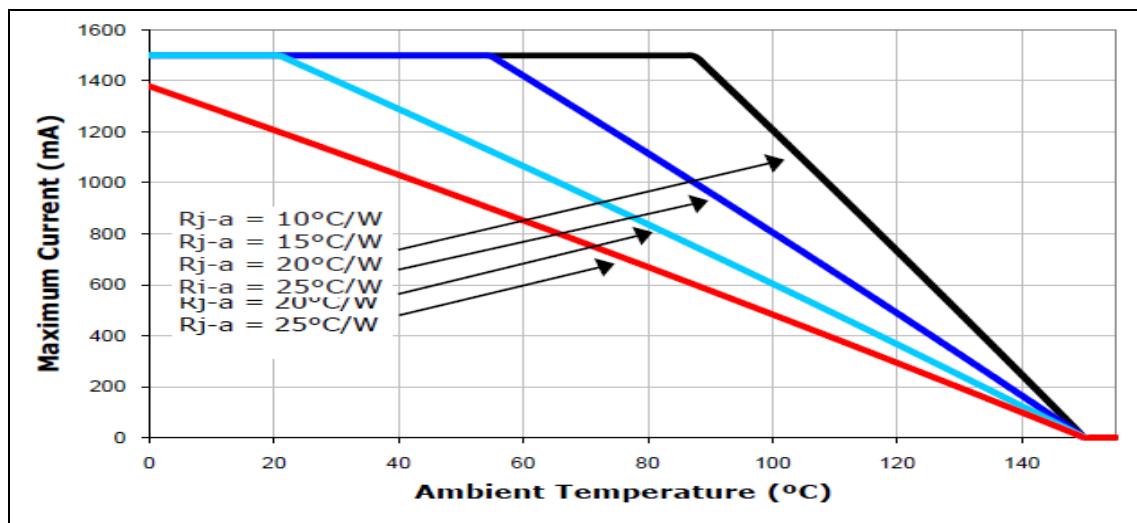


Figura 4. Máxima corriente de trabajo en función de la T_A (XP-G de CREE).

Observando que las características más importantes del LED, el flujo luminoso y la máxima corriente de trabajo, dependen principalmente de la temperatura de unión, es muy importante realizar una correcta disipación del chip para que éste sea lo más estable posible en el funcionamiento habitual. En la figura 5 se muestran las resistencias térmicas que actúan en la disipación de la T_j .

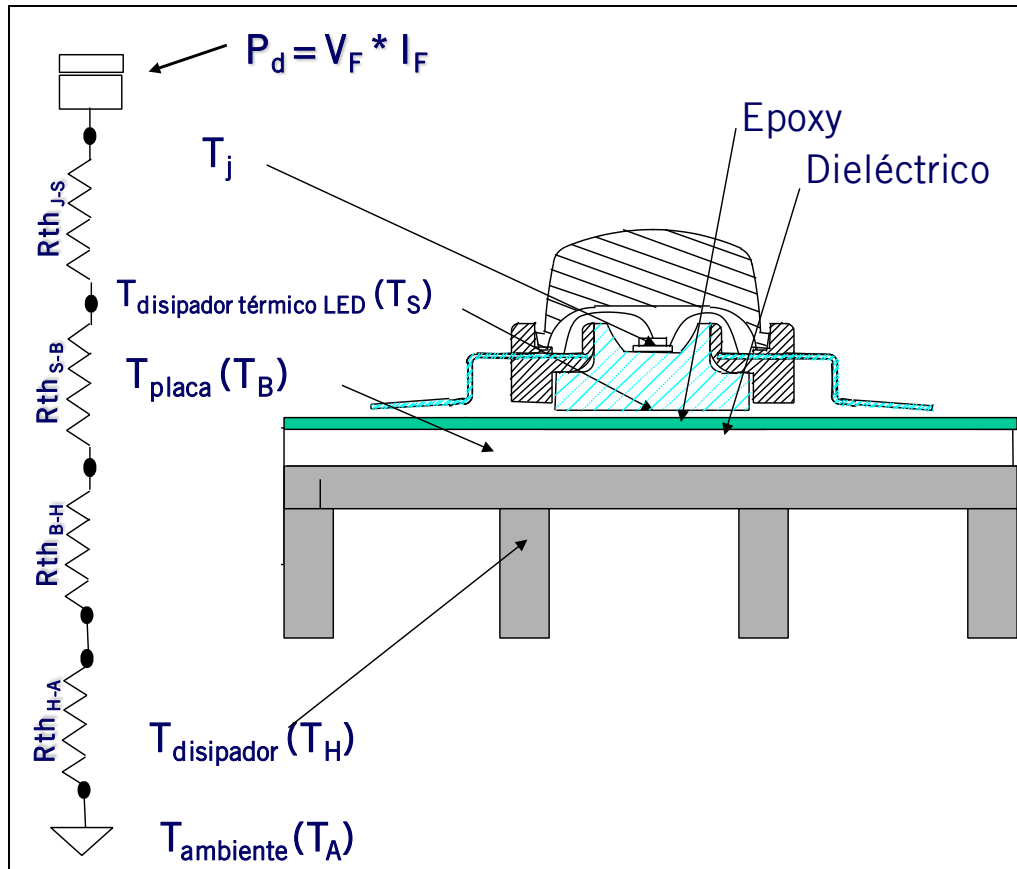


Figura 5. Resistencias térmicas del conjunto LED-Disipador

En la figura anterior, P_d es la potencia disipada por el chip del LED, siendo directamente proporcional a la tensión y corriente directa (Forward) del componente. El chip está soldado a un disipador térmico que físicamente es una conexión más, el PAD Térmico, como lo son el ánodo y el cátodo (ver figura 6). Este PAD térmico se debe soldar correctamente a la placa PCB y ésta tener la mejor transferencia de calor posible al disipador, obteniendo en ese punto una temperatura T_s que es prácticamente igual a la T_j . La T_s es conducida a través de la placa de circuito impreso donde se suelda el LED, siendo ésta de aluminio (MCPCB) en el mejor de los casos y de fibra de vidrio a doble cara (FR4) en el caso más económico y menos efectivo [3].

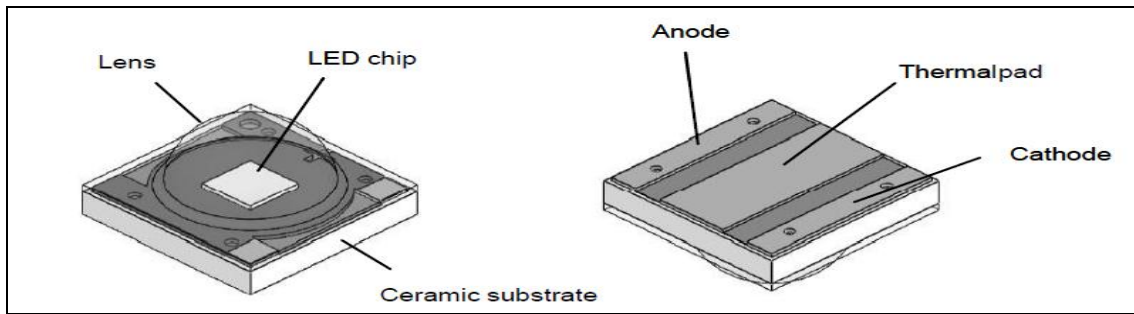


Figura 6. Package del XLamp XP de CREE

En el caso de realizar el montaje del LED en una placa FR4, es muy importante el diseño de las vías que van a disipar la T_j ya que deben ser las suficientes como para disipar la temperatura y que tengan el diámetro óptimo que permita rellenar los huecos con estaño en el proceso de soldado. De este modo se garantiza el contacto suficiente con la capa inferior de cobre y se disminuye la resistencia térmica. En la figura 7 se representa el esquema básico de este diseño[3].

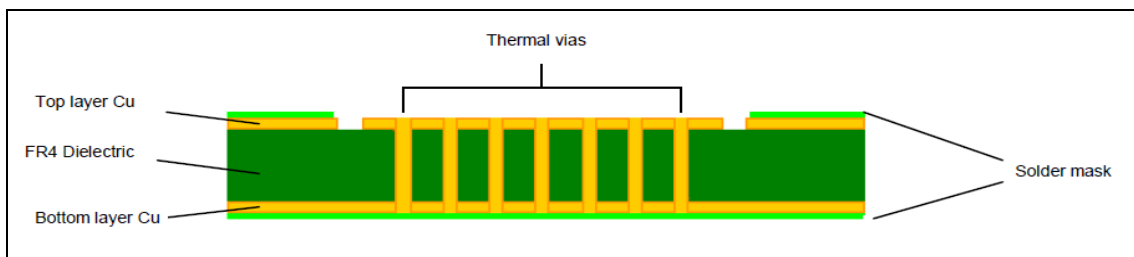


Figura 7. Sección de placa de circuito impreso FR4 con vías térmicas.

La mejor disipación de T_j se consigue con placas PCB de aluminio (ver figura 8) obteniendo una resistencia térmica de prácticamente la mitad que en placas de FR4. Para que ésta última llegue a niveles similares del MCPCB se deben realizar cerca de 20 vías y ser todas cubiertas de estaño [3]. Además, el fabricante de las placas debe disponer de la tecnología suficiente para realizar este tipo de vías con una gran precisión.

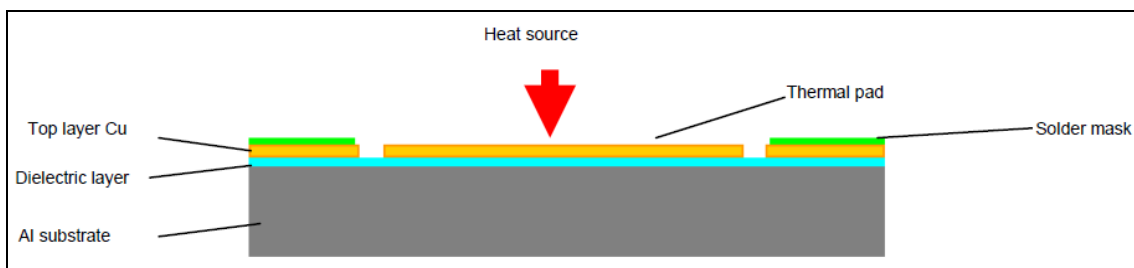


Figura 8. Sección de placa de circuito impreso MCPCB.

Con el tipo de placa de circuito impreso elegida y conociendo su resistencia térmica es posible calcular qué clase de disipador colocar ($R_{th\ H-A}$) para mantener la T_J dentro de los rangos elegidos, que no disminuya el flujo luminoso y no llegar a los niveles máximos de disipación de potencia con la consiguiente ruptura del componente.

$$T_J = T_A + Pd (R_{th\ J-S} + R_{th\ S-B} + R_{th\ B-H} + R_{th\ H-A})$$

T_J es fijado a su valor máximo ya que será el caso más desfavorable en la disipación de la temperatura y es aportada por el fabricante del LED (aproximadamente entre 145 y 150°C). El valor de la suma de la resistencia térmica unión-disipador del chip ($R_{th\ J-S}$) y la resistencia térmica entre la placa PCB y el disipador ($R_{th\ B-H}$) depende del material de la placa elegida, de la presión ejercida entre componentes, del área de contacto y del tipo de material aislante. Un buen diseño y montaje de dicha suma ($R_{th\ J-S} + R_{th\ B-H}$) minimizan dicho valor a menos de 1°C/W [3]. En la unión de la placa PCB con el disipador se puede emplear silicona térmica adhesiva por las dos superficies y aislante.

En el mercado existen disipadores de diferentes tamaños y formas que en la mayoría de los casos se adaptan a las formas más usuales de lámparas y si es algo especial se recurre al mecanizado de la pieza. La empresa “*Fischer Elektronik*” ofrece un importante abanico de alternativas de disipadores especialmente diseñados para este tipo de aplicaciones, ver figura 9. Para proteger el LED de la rotura por la superación de T_J se puede colocar un termistor NTC dando la información necesaria para disminuir la corriente que circula, o incluso anular ésta, en caso de sobrepasar dicha temperatura. Algunos fabricantes de LED introducen la NTC en la placa PCB, normalmente en los encapsulados multi-die (varios chips). Lumileds (Philips-Luxeon) comercializa la serie *Fortimo* [4] con este valor añadido.



Figura 9. Disipadores para LEDs de Fischer Elektronik.

Aunque no afecta al funcionamiento eléctrico del LED, otra característica importante es la distribución de la luz. Si la curva lumínica propia del componente no es la apropiada, mediante ópticas normalmente de policarbonato se puede variar su forma y concentración, obteniendo con cada una de ellas una distribución lumínica adaptada a cada necesidad. Ver el ejemplo de ópticas en la figura 10.

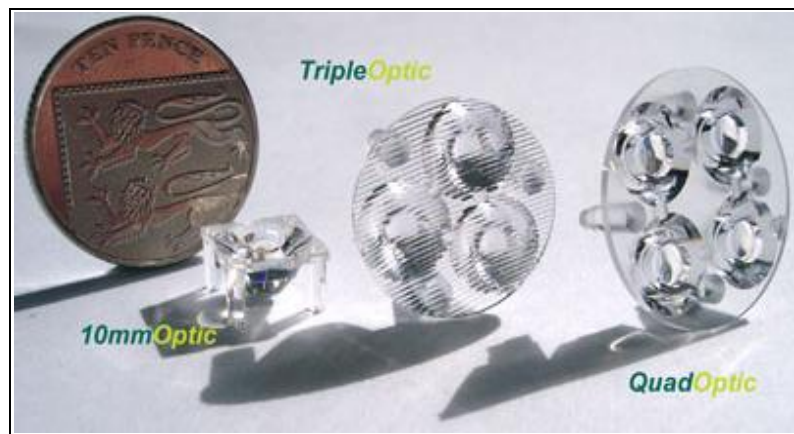


Figura 10. Ópticas de 1, 3 y 4 LEDs de la empresa Carclo-Optics

1.2 Características eléctricas y configuración de conexionado

Actualmente existen en el mercado dos potencias básicas de LED, de 1 y 3 W. A partir de ellos se realizan los llamados “multi-die” o “LED Array” que incorporan en el encapsulado varios chips de 1 o 3W conectados en serie o paralelo para realizar un

componente de mayor potencia. En la tabla 2 se observa la caída de tensión y corriente que circula por el “die” (chip del LED) en condiciones normales, haciéndose referencia al chip de colores fríos (blanco frío con una temperatura de unos 6000°K y blanco cálido con una temperatura de unos 4500°K) ya que son los más empleados en iluminación. Los colores cálidos (rojo-amar) tienen una caída de tensión directa (V_F) de aproximadamente 2,5V en potencias de 0,8 a 1W.

Tipo de LED	Potencia (W)	V_F (V)	I_F (A)	$I_{F_{max}}$ (A)
Single-die (genéricos)	1	3,2÷3,4	0,35	1
	3	4,2÷4,4	0,7	3
Multi-die (genéricos)	5	7,1	0,7	3
Multi-die (CXA2011 de CREE)	11	40	0,27	1

Tabla 2. Tensión directa (V_F) y corriente directa (I_F) de algunos LED actuales.

La alimentación de los LEDs se puede realizar de dos maneras: suministrar una tensión constante limitando la corriente directa (I_F) por el LED, o generar una corriente constante teniendo en cuenta la caída de tensión en el LED a esa corriente.

Diseñar o utilizar una fuente de corriente constante es la mejor opción ya que los fabricantes proporcionan la curva del flujo luminoso frente a I_F y, a partir de esa corriente, la tensión directa (V_F). Además, la eficiencia es mayor al ser más precisa la I_F y no tener pérdidas de energía por la resistencia limitadora necesaria para la fuente de tensión constante. Es por esto que la selección del LED se realizará de la siguiente manera:

1. Seleccionar un LED con los lúmenes requeridos a una T_j determinada y a la que se va a trabajar, teniendo en cuenta su curva de distribución lumínica y si fuera necesario colocar ópticas.
2. Obtener la I_F necesaria para obtener esos lúmenes típicos (serán los requeridos anteriormente).
3. Obtener la V_F a la corriente que se le va a suministrar.

Para conseguir los lúmenes deseados en el producto final (luminaria), normalmente habrá que conectar varios LEDs en serie o en paralelo, ver figura 11. Se ha deducido que lo ideal es conectar todos en serie, para asegurar la misma corriente directa en todos y, por lo tanto, la misma luminosidad y brillo. Además con esta configuración se protegen de la corriente máxima que podría destruirlos y es posible suministrar la energía con una fuente de corriente constante como se ha mencionado anteriormente.

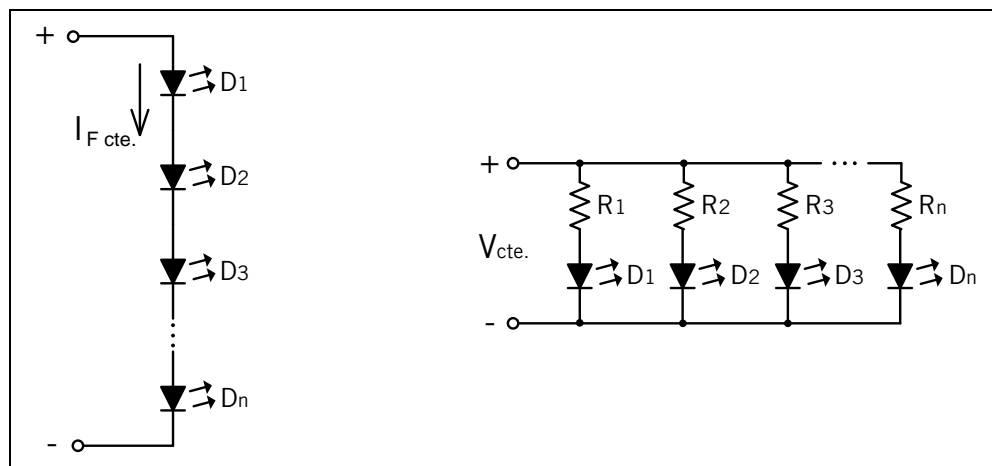


Figura 11. Configuración serie y paralelo

La configuración en paralelo tiene las ventajas de tener una conexión común, el ánodo o el cátodo, y necesitan una menor tensión de trabajo; pero como mayor desventaja la uniformidad en el brillo al no tener la misma I_F .

Además, los fabricantes de módulos “*multi-die*” conectan normalmente los chips en serie, por lo que la fuente de alimentación podrá ser válida también para estos. Destacar también que los WOLEDs (próxima generación de los LEDs) son controlados con corriente constante.

Seleccionados los LEDs y conociendo sus características eléctricas, se fija la I_F para calcular la tensión total necesaria (la suma de todas V_F a la corriente fijada) y realizar el equipo que generará la potencia al conjunto.

La tensión que deberá proporcionar la fuente (V_{OUT}) deberá ser algo mayor que la suma de todas las caídas de tensión de los LEDs a la corriente I_F .

$$V_{OUT} > V_{D1} + V_{D2} + V_{D3} + \dots + V_{Dn}$$

Cuando hay que poner una gran cantidad de diodos la mejor opción es ramificarlos y conmutar cada una de las ramas a una frecuencia elevada, suficiente para que no sea visible por el ojo humano. De este modo, con una misma corriente se pueden hacer trabajar diferentes ramas de diodos conectados en serie, ver figura 12.

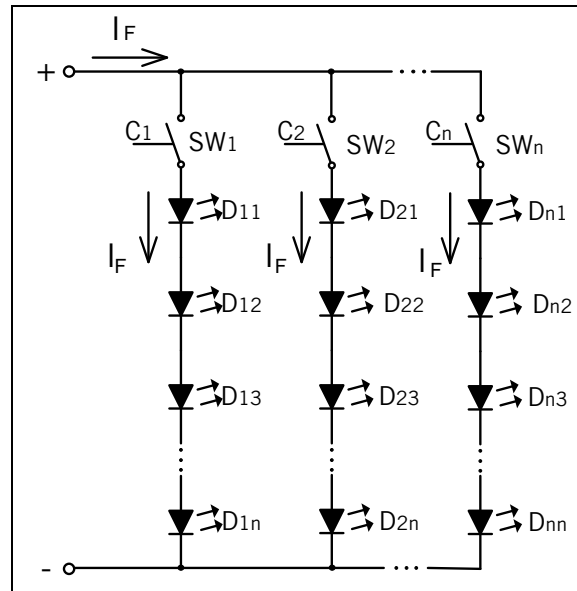


Figura 12. Configuración para grandes potencias

Como conclusión a los argumentos presentados hasta el momento, en este trabajo se realizará la conexión de los LEDs en serie y serán alimentados con una corriente constante.

1.3 Pérdidas en el LED y eficiencia real

Antes de comenzar a diseñar una luminaria de SSL hay que tener en cuenta las pérdidas de cada componente que interviene en el conjunto final, ver figura 13, con el objetivo de conseguir los lúmenes requeridos, ver tabla 3, y así calcular el número de LEDs necesarios.

Pérdidas	Datos para 100 Lm/W a una I_F de 350mA	Datos para 100 Lm/W a una I_F de 700mA
Pérdidas por temperatura	$\approx 15\% \approx 85\text{Lm/W}$	$\approx 15\% \approx 85\text{Lm/W}$
Pérdidas por no linealidad	$\approx 0\% \approx 85\text{Lm/W}$	$\approx 30\% \approx 59.5\text{Lm/W}$
Pérdidas del elemento óptico	$\approx 9\% \approx 77.35\text{Lm/W}$	$\approx 9\% \approx 54.15\text{Lm/W}$
Pérdidas de la fuente de alimentación	$\approx 13\% \approx 67.3\text{Lm/W}$	$\approx 13\% \approx 47.11\text{Lm/W}$
Eficiencia real del sistema LED	$\approx 67.3\text{Lm/W}$	$\approx 47.11\text{Lm/W}$

Tabla 3. Pérdidas aproximadas en iluminación SSL. [5]

Los datos proporcionados son para un diodo de 1W y los lúmenes típicos son a una I_F de 350mA. La corriente máxima que soporta el LED es de 1A por lo que se podría pensar en aumentar la I_F para conectar un menor número de LEDs, como se observa en la segunda columna (alimentado a 700mA), pero la eficiencia disminuye al no ser lineal la corriente con el número de lúmenes y además se pierde vida útil del LED.

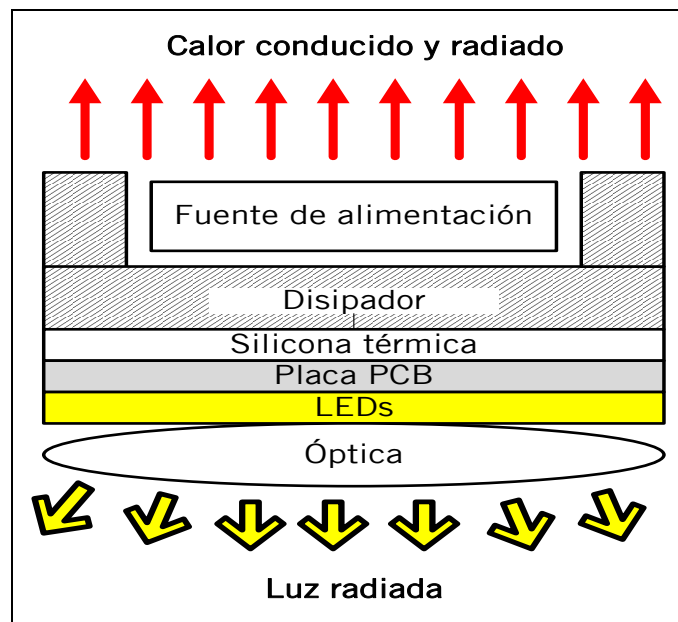


Figura 13. Partes de una luminaria SSL.

El flujo lumínico, la distribución de la luz y el consumo eléctrico son características críticas. Para el conjunto de la luminaria las características más importantes son: el coste final, la duración, el rango de temperaturas de trabajo y nivel de humedad máximo, el color de temperatura (grados kelvin), el CRI, que se pueda fabricar y fácil de instalar [4].

1.4 Degradación de un LED

Una nueva normativa denominada **TM21** será efectiva en octubre de 2011 en EEUU (en Europa se impondrá en 2012) y reemplazará a la *ENERGY STAR*. Proporcionará el tiempo de vida estimado del diodo LED partiendo de los datos obtenidos mediante la curva estándar LM-80 de degradación, es decir, el cambio en la cantidad de luz emitida por una fuente lumínica a lo largo de su vida operativa en relación a la cantidad de luz medida inicialmente. Esta curva estándar es proporcionada por el fabricante y basada en la normativa IES LM-80-2008, publicada por la Asociación de Ingeniería de Iluminación (IES) de EEUU para caracterizar la degradación de un LED. Las fuentes de luz tradicionales se degradan de manera gradual hasta que se destruyen ("burn out"). Sin embargo, los LEDs no fallan de manera catastrófica sino que pierden luz gradualmente durante periodos muy largos; cuanto más baja sea la corriente y las temperaturas de funcionamiento, más largas serán las curvas de degradación [2].

La vida de un LED es irrelevante ya que puede que el resto de sus componentes de degraden con antelación y deje de funcionar o el sistema pierda sus propiedades [2]:

- El **disipador del LED** es muy importante como se ha dicho anteriormente. Si no está bien diseñado o montado pone en compromiso al resto de componentes.
- La **fuentes de alimentación del LED o "driver"** es el componente más frágil del sistema ya que la vida útil es de 30.000 a 40.000 horas.
- La **óptica**, al ser de plástico (polímeros), puede amarillearse con el tiempo sobre todo si es de baja calidad y no está tratada contra el calor y los rayos ultravioleta.

1.5 Beneficios y futuro del LED

Los beneficios del diodo LED como fuente de luz son los siguientes (actualmente):

- Alta eficiencia disponible en el mercado 130 Lm/W.
- Vida útil media de 50.000horas (70% flujo).
- Encendido instantáneo (T^a , color y luz 100%).
- Luz direccionada y flexibilidad en el diseño (LED + óptica).
- Robusto, a prueba de vibraciones.
- Operación a bajo voltaje.
- CRI típico: 90 (Blanco Cálido).
- Respetuoso con el medio ambiente (cumple con la directiva RoHS y no contiene mercurio).

Además, los avances tecnológicos están mejorando las características del componente:

- Mayor eficiencia, disponible 140lm/W, en blanco frío mejora el Lm/\$.
- Bajada de los costes, mayor competencia y mayor demanda.
- Aumento de la linealidad, a más corriente más flujo lumínico.
- Menor variación del color versus la temperatura.
- Mejora en la capa de fosforo, CRI más elevado con menor pérdidas en eficiencia.
- Mejoras en la fabricación, mayor control de fabricación de “bines”
- Menor resistencia térmica R_{th} , mayor capacidad de disipar.
- Los fabricantes proporcionan más datos de fiabilidad.
- Comienza la comercialización de nuevos LEDs a corriente alterna, ideales para el "retrofit" de lámparas (encapsulado de lámparas de otra tecnología tipo a la incandescencia, etc.)
- Cada vez existen más componentes electrónicos asociados especializados en SSL.
- Las lentes son cada vez más eficientes.
- Aparecen los LEDs “*wire bonding*” que son mucho más robustos, ya que aumenta la fiabilidad del dispositivo y minimiza los costes de fabricación optimizando el proceso de unión entre componentes del chip.
- Aparecen en el mercado LEDs que si fallan se cortocircuitan, evitando así que el sistema “se pare” por la conexión de éstos en serie.

Alimentación para la iluminación de estado sólido

2.1 Introducción

Suponiendo un sólo LED de 1W y de color frío, con características eléctricas básicas $I_F = 350$ mA y una caída de tensión V_F de 3.5V, la alimentación para hacer trabajar el componente podría ser muy sencilla: partiendo de una tensión continua superior a la V_F y con una simple resistencia limitadora de corriente o con un regulador lineal sería suficiente para obtener la iluminación del LED, ver figura 14.

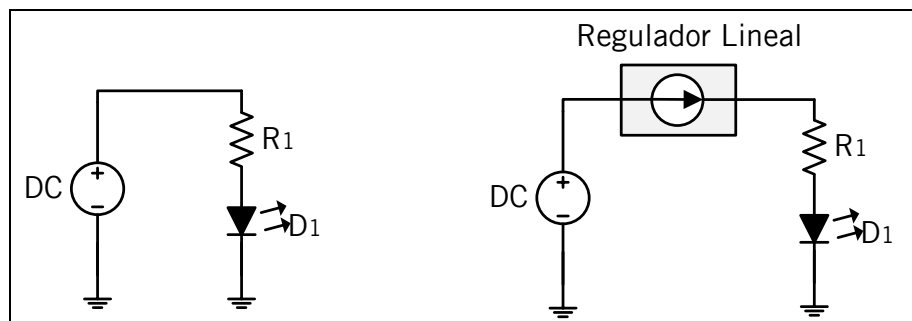


Figura 14. Alimentaciones básicas para el LED de potencia.

La desventaja de estos sistemas es la generación de una gran cantidad de calor por la energía perdida disipada de la resistencia o del regulador, obteniendo una baja eficiencia del sistema, además de la inestabilidad de éstos. Por otro lado, y sobre todo, la precisión y control ante posibles perturbaciones son inexistentes y cualquier variación en la entrada de alimentación o en la temperatura es repercutida en el LED, por lo que se considera un sistema inestable y peligroso para el componente. Si esta inestabilidad, eficiencia y precisión se trasladan al total de todos los diodos LEDs que compondrán la luminaria, el calor generado será muy grande por la energía total disipada, afectando también a la luminosidad de los diodos y sobre todo a la vida útil de éstos. Partiendo de que el LED va a estar trabajando durante un largo tiempo y se debe mantener la mayor uniformidad posible en la iluminación, hay que diseñar alimentadores con la mayor eficiencia posible y, si es posible, a un bajo coste.

El diseño se ha fijado para controlar 6 LEDs de potencia y se ha seleccionado la referencia **XLamp XM-L** de la marca **CREE** sobre todo por su gran efectividad y baja resistencia térmica, 2.5°C/W. Consultado el datasheet [7] la (I_F) típica es de 700mA y ofrece 280Lm; la corriente máxima que soporta es de 3,5A por lo que es posible aumentar I_F para obtener mayor flujo luminoso. Aumentado a 1A se consigue una luminosidad de 385Lm, y la tensión que se queda el LED (V_F) a esta corriente es de 3,5V. Con estos datos, el alimentador que se va a diseñar, debe ofrecer una corriente constante de 1A. La potencia total de salida será:

$$[(3,5V \times 6)] \times 1A = 25W$$

Como dato a tener en cuenta, se han consultado varias referencias de LEDs de potencia de los principales fabricantes (CREE, Philips, OSRAM, Seoul), el resto normalmente realizan copias o siguen a estos, llegando a la conclusión de que las corrientes más usuales de trabajo típicas (I_F) son de 350mA y 700mA.

2.2 Normativa aplicable al diseño

Para comenzar el diseño primeramente es muy importante conocer las normas de producto y seguridad eléctrica que se les aplica, para su correcto funcionamiento y comercialización.

Las normativas a aplicar en el diseño y construcción del producto son las siguientes:

UNE-EN 61347-2-13. Dispositivos de control de lámpara. Parte 2-13: Requisitos particulares para dispositivos de control electrónicos alimentados con corriente continua o corriente alterna para módulos LED.

UNE-EN 62394. Dispositivos de control electrónicos alimentados en corriente continua o corriente alterna para módulos LED. Requisitos de funcionamiento.

Y las normas a aplicar límites de perturbaciones radioeléctricas, compatibilidad electromagnética y seguridad eléctrica son las siguientes:

UNE-EN 55015. Límites y métodos de medida de las características relativas a la perturbación radioeléctrica de los equipos de iluminación y similares.

UNE-EN 61000-2-12. Compatibilidad electromagnética (CEM). Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de distribución pública en media tensión.

UNE-EN 61000-3-2. Compatibilidad electromagnética (CEM). Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada $\leq 16A$ por fase).

UNE-EN 61547/A1. Equipos para alumbrado de uso general. Requisitos de inmunidad-CEM.

2.3 Configuraciones para realizar la alimentación

A partir de la tensión general que ofrece la empresa suministradora de energía de 230V 50Hz ± 10 % de tolerancia, lo primero que hay que pensar es en reducir ésta y convertirla a una corriente continua para alimentar a los LEDs. La corriente constante a la salida se puede obtener de múltiples maneras diferentes. De entre todas las opciones revisadas se proponen las tres siguientes, totalmente aisladas:

1. Convertidor AC-DC flyback en modo de corriente constante.
2. Convertidor AC-DC para alimentar a un convertidor DC-DC de corriente constante.
3. Convertidor AC-DC flyback específico para aplicaciones LEDs.

La industria cada día avanza más rápido y los tiempos de ejecución de los diseños se van recortando para no quedarse obsoletos y ser competitivos. Por esto, y porque la actual tecnología de integración lo permite, las empresas dedicadas a la fabricación de circuitos integrados para diferentes aplicaciones invierten cada vez más en integrar la mayor cantidad de componentes posibles en el chip ofreciendo productos sencillos y fiables, de modo que el cliente final consiga un fácil y rápido diseño en su aplicación. Además, estos fabricantes facilitan herramientas de simulación, placas de evaluación, programas para el diseño de las aplicaciones con mayor facilidad e incluso herramientas informáticas que ayudan en el diseño del transformador para una fuente de alimentación tipo flyback.

Con el fin de conseguir un "driver para LED" más fiable, rápido y económico, se van a emplear las herramientas que ofrecen los fabricantes aprovechando el aumento considerable de circuitos integrados específicos, en este caso para iluminación SSL. Finalmente, para la selección de una de las configuraciones propuestas se valorará en mayor grado el coste total del diseño y la eficiencia, considerando como variable de partida una fiabilidad prácticamente igual en todos los diseños, al trabajar con primeras marcas comerciales.

2.3.1 Convertidor AC-DC flyback en modo de corriente constante.

Los principales fabricantes de circuitos integrados para fuentes conmutadas de alimentación, **Power Integrations** (líder mundial en fabricación de estos chips para dichas aplicaciones), **Fairchild** y **STMicroelectronics** ofrecen herramientas interesantes para el diseño de estas fuentes. El diagrama de bloques de esta configuración se muestra en la figura 15.

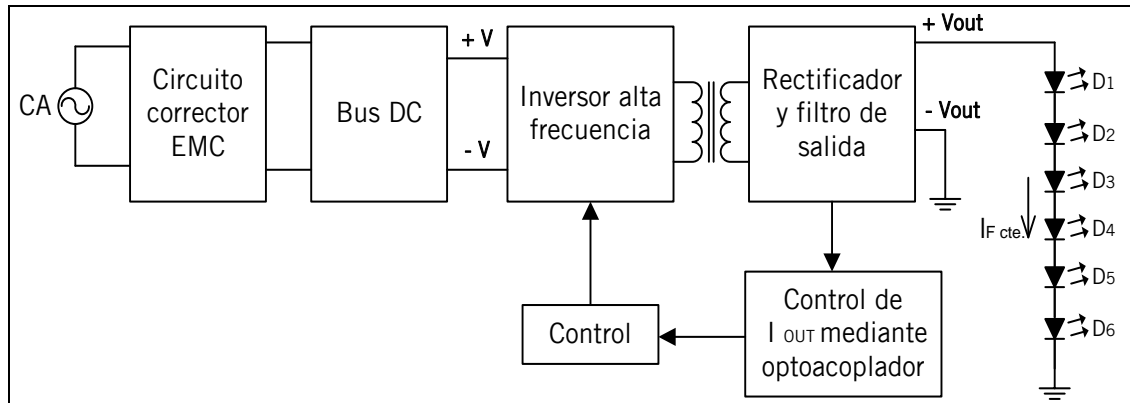


Figura 15. Diagrama de bloques AC-DC Flyback de corriente constante.

De los fabricantes existentes en el mercado se opta por **Power Integrations** por la fiabilidad de sus componentes, por la excelente relación calidad-precio y por ser el mayor productor de chips para fuentes conmutadas tipo flyback. Además, posee una herramienta muy potente y útil, **PI Expert Design Software** (disponible en su página web <http://www.powerint.com/en/design-support/pi-expert-design-software>), para configurar el diseño requerido y obtener de una manera muy sencilla la construcción del transformador de la flyback ajustando los parámetros más importantes. El diseño realizado con esta herramienta para nuestra aplicación se puede consultar en el anexo I, siendo sencillamente una flyback en modo de corriente continua que controla la corriente de salida mediante la realimentación del optoacoplador y de un dispositivo "sensor" que obtienen la información en el secundario para mostrársela al primario con el objetivo final de controlar el MOSFET de la fuente y así realizar la regulación de la corriente. La eficiencia máxima que se ha conseguido optimizando el diseño en "PI Expert Design" ha sido del 86%. En el anexo I se puede consultar el diseño para la potencia deseada y el desglose del coste.

El coste total real aproximado del diseño sin placa de circuito impreso es de 5,38€.

2.3.2 Convertidor AC-DC alimentando a convertidor DC-DC de I constante.

Los circuitos integrados para realizar convertidores DC-DC de corriente constante alimentados por una tensión continua y específicos en iluminación para LEDs están muy presentes hoy en día en el mercado por su bajo coste y alta efectividad. Además, son respaldados por la demanda de grandes sectores como la iluminación y la automoción. Un claro ejemplo lo aportan los fabricantes de coches al introducir en los nuevos modelos la iluminación con LEDs cumpliendo la nueva normativa del alumbrado de posición e integrando también estos convertidores en la iluminación de los cuadros. Por otro lado, las lámparas retrofit de LED sustituyen a las lámparas típicas bipin halógenas de 12V e incorporan uno de estos circuitos integrados para ser alimentados por el mismo transformador de 12Vac que alimentaba a la lámpara halógena. Los principales fabricantes de estos convertidores son *National Semiconductor*, *MPS (Monolithic Power Systems)*, *Diodes (Zetex)*, *On Semiconductor* y *NPX (Philips)*, entre otros, así como las empresas *MPS* o *RECOM-Power* que ofrecen el convertidor con todos sus componentes (circuitos integrado, bobinas, resistencias, etc.) en encapsulado DIP (serie RCD-24 de RECOM-Power) como un componente más para insertar en la placa PCB y ser alimentado con una tensión continua.

Con unos pocos componentes para el circuito integrado y la fuente de alimentación de continua para alimentar al driver DC-DC es posible realizar el conjunto del sistema que genere la I_F constante para los LEDs. El inconveniente de esta configuración es que la generación de EMI puede ser mayor debido a la emitida por la flyback más la producida por la bobina que se coloca en el convertidor DC-DC. Además, la eficiencia suele ser menor ya que se suman las pérdidas de la flyback más las del driver de corriente constante. El diagrama de bloques se muestra a continuación en la figura 16.

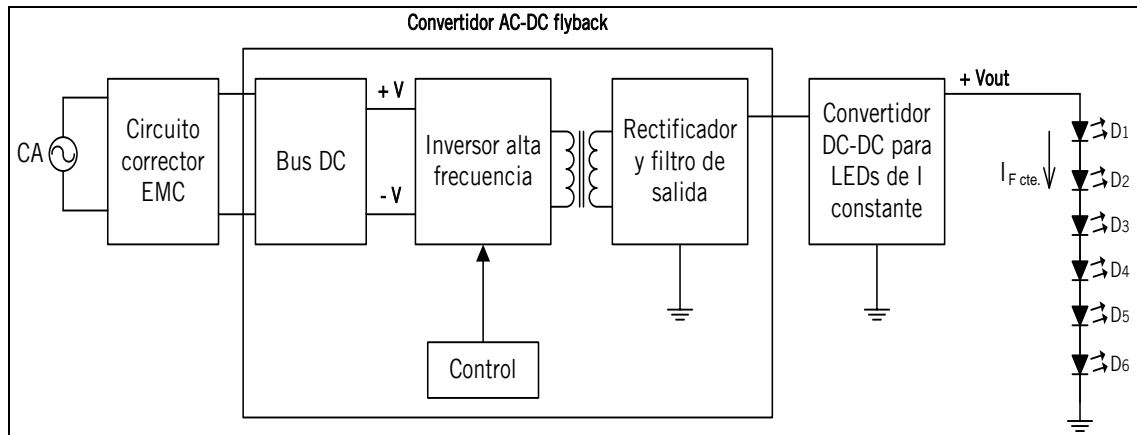


Figura 16. Diagrama de bloques de un convertidor DC-DC de I constante alimentado con flyback.

Los convertidores DC-DC de corriente continua para LEDs tienen una mayor eficiencia funcionando en modo reductor “*buck*”, siendo esto posible porque la tensión de la fuente de alimentación se puede ajustar al valor más eficiente para el convertidor cuando se realiza el diseño.

La fuente de alimentación del driver DC-DC se ha elegido una flyback de Power Integrations, pero podría alimentarse con cualquier tipo de fuente de alimentación, y al fabricante. El convertidor DC-DC de corriente constante tipo “*buck*” se realiza con el fabricante **National Semiconductor** por ofrecer mejor eficiencia, calidad y herramientas de trabajo que el resto de sus competidores, además de un precio muy atractivo. Este fabricante proporciona una herramienta llamada **Webench Design** para la selección del integrado adecuado y el cálculo los componentes externos. La eficiencia máxima del diseño que se ha obtenido ajustando los valores es del 95%, con un coste de materiales medio. Se ha aumentado el coste de los materiales, mayor valor del inductor de salida y condensadores con un bajo ERS, pero la eficiencia aumenta solamente en un punto por lo que no compensa el sobrecoste. Para la fuente de alimentación la eficiencia puede variar entre el 85% (diseño de fuente flyback con el software de PI Expert Design de Power Integrations) y el 92% (diseño de fuente flyback realizado con la aplicación Flyback - Fairchild Power Switch Excel-based Design Tool de Fairchild), se toma un valor del 87%. Por lo que si la fuente tiene una eficiencia del 87% y el convertidor DC-DC del 95%, la eficiencia total del sistema será del 82%. En el anexo II se puede consultar el diseño, realizado con el software **Webench Design**, para la potencia deseada y el desglose del coste.

El coste total real aproximado del diseño, sin placa de circuito impreso es de 6,08€.

2.3.3 Convertidor AC-DC flyback específico para aplicaciones LEDs.

En la investigación realizada se han conseguido muy pocas alternativas de fabricantes que ofrezcan soluciones integradas, específicas de este tipo de convertidores aunque sean las más eficientes por ser específicas para LEDs, **MPS** y **Linear Technology** son las firmas que más han avanzado en estos convertidores. El estudio se va a centrar en el integrado **LT3799** comercializado en 2011 por **Linear Technology**, por tener un mayor valor del factor de potencia que el controlador MP4020 de MPS. Además, proporciona una elevada efectividad y eficiencia con pocos componentes añadidos. Soporta potencias de salida comprendidas desde 4 hasta 100W, dependiendo del MOSFET y calculando los componentes externos, de diodos LEDs para iluminación y es fácilmente configurable. El diagrama de bloques básico se muestra en la figura 17.

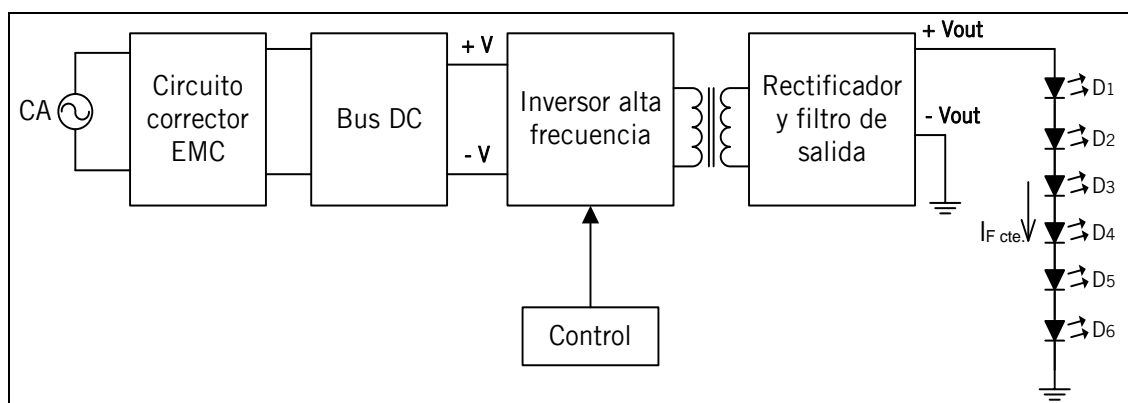


Figura 17. Diagrama de bloques del convertidor AC-DC flyback específico para aplicaciones LEDs.

La eficiencia optimizada para una alimentación de 230V es del 85% [6]. En el anexo III se puede consultar el diseño y el desglose del coste.

El coste total real aproximado del diseño sin placa de circuito impreso es de 4,662€.

A continuación se detalla una tabla resumen con las tres propuestas con el objetivo de seleccionar la de menor coste y una eficiencia aceptable, como se ha comentado al inicio de este apartado.

Opciones de diseño	Eficiencia	Coste
2.2.1. AC-DC corriente constante	86%	5,38 €
2.2.2. AC-DC y convertidor DC-DC	82% (conjunto)	6,08 €
2.2.3. AC-DC específico para LEDs	85%	4,662 €

Tabla 4. Tabla resumen con las diferentes opciones de diseño.

En la tabla se observa que la configuración del convertidor AC-DC específico para LEDs tiene un menor coste, una eficiencia bastante aceptable e incorpora corrector de PFC integrado, por lo que es el diseño seleccionado como driver para LEDs.

El precio de los materiales se ha consultado a los distribuidores de componentes:

- **Arrow Iberia**, distribuye componentes pasivos y activos y representa entre otras marcas a National Semiconductor y Linear Technology.

- **Eurotronix**, distribuye componentes pasivos y activos y representa entre otras marcas a Power Integrations y MPS.

El coste de los transformadores se solicitó a TECHCON ELECTRICAL LTD, empresa asiática especializada en la fabricación de componentes inductivos.

Se ha realizado un pequeño estudio de mercado de los equipos de fuentes de alimentación para LEDs de los principales fabricantes, **Tridonic**, **OSRAM**, **Philips** o **Meanwell** entre otros, y utilizan en sus diseños una fuente de corriente constante AC-DC tipo flyback, primera opción explicada, por ser menos costosa que la fuente de alimentación más el driver de corriente continua DC-DC. Estos equipos fueron comprobados en marzo de 2011, por lo que se supone que el diseño estaría realizado durante el año 2010 y no existían todavía alternativas a la primera y segunda opción.

La alternativa seleccionada en este caso, convertidor AC-DC específico para LEDs, es previsible que estos principales fabricantes comiencen o hayan comenzado a emplearlo en sus nuevos diseños ya que el coste es menor y está fabricado específicamente para la alimentación de LEDs, y se prevé que conforme la tecnología en estos convertidores aumente, la eficiencia también lo haga. Según las informaciones de los distribuidores en España de marcas como Fairchild (distribuye Arrow Iberia) y

Power Integrations (distribuye Eurotronix), para el segundo semestre del próximo año 2012 comenzarán a comercializar este tipo de convertidores tipo al de Linear Technology.

En el datasheet del integrado LT3799 se puede consultar su funcionamiento y configuración según la potencia que se quiera obtener a la salida [6]. Como parte importante en el diseño especificado, el principal problema existente está en la construcción del transformador. Es necesaria una tolerancia del $\pm 1\%$ en el número de vueltas de los bobinados para tener una buena precisión en la corriente de salida, ya que depende de una resistencia de sensado y el número de vueltas en el bobinado. Los fabricantes asiáticos ofrecen tolerancias mayores, por lo que el coste del transformador será mayor y existe un campo más pequeño de alternativas para su fabricación.

El MOSFET debe tener un bajo Q_g y así reducir las pérdidas de conmutación. De esta manera se obtiene una mayor eficiencia.

En el caso de que un LED falle, si se queda en circuito abierto, o que se active la fuente y la carga de los LEDs no esté conectada, el alimentador quedaría en circuito abierto por lo que la tensión de salida aumentaría hasta provocar un sobrecalentamiento en alguno de los componentes llegando a su destrucción. Para evitar, se ha llegado a la conclusión de que colocando un diodo zéner a la salida, de una tensión superior a la V_{OUT} , como se muestra en la figura 16, es posible resolver esta situación.

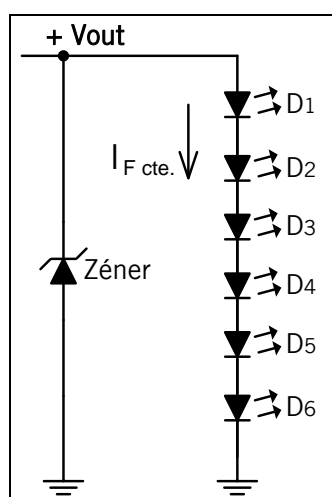


Figura 18. Protección contra circuito abierto.

Como se ha comentado en la sección anterior, los LEDs de potencia tienen una duración superior a 50.000 horas por lo que, en el diseño de la fuente se debe tener especial cuidado en la elección de los componentes más críticos, para intentar llegar a la máxima vida útil posible. Por este motivo se presta especial atención a los condensadores electrolíticos, debiéndose elegir de la mayor temperatura máxima posible, normalmente de 125°, y que el nivel del “ripple current” sea lo más alto posible para aumentar la vida de estos, aún así se debe colocar un valor de capacidad del condensador suficiente para obtener un bajo nivel de rizado de la corriente de salida, alargando de esta manera la vida del condensador y de los LEDs de potencia [8]. Los condensadores en la entrada de alimentación de 230V de film deben ser tipo X (X1 es más robusto que el X2) para garantizar una mayor vida y el filtro EMI sea lo más eficiente posible. También se debe prestar atención al tipo de hilo de cobre empleado en el transformador y emplear de doble aislamiento, para soportar mayor tensión de ruptura y, por lo tanto, ser más robusto y cumplir con las normativas aplicadas. En el anexo III, se pueden observar las fotografías de la placa de evaluación que se solicitó a Linear Technology sobre este diseño, y algunas de las ondas de la simulación del diseño.

Conclusiones

El sistema de iluminación de estado sólido (SSL) está integrado por los siguientes componentes: disipador de calor, placa de circuito impreso PCB para los LEDs, diodo/s LED/s de potencia como fuente de luz, fuente o driver de alimentación y óptica. Todos ellos son fundamentales para el sistema en su conjunto y el aspecto más crítico, porque puede ser fuente de problemas, es el calor generado por el funcionamiento del LED.

Una adecuada disipación de la temperatura de unión del LED, T_j , es el objetivo prioritario en lo que se refiere a la fuente de luz para que ésta trabaje de forma óptima. El disipador es muy importante y limita la corriente máxima a la que puede trabajar el LED, dentro del rango máximo. No hay que olvidar que la conducción de calor de la T_j se realiza a través de la placa de circuito impreso (PCB) y que debe tener una baja resistencia térmica, optimizando al máximo esa conducción mediante PCB de aluminio.

La elección del diodo LED de potencia y la cantidad de ellos a colocar dependerá principalmente de los lúmenes que se quieran conseguir con el sistema SSL, teniendo en cuenta que deben de tener el mismo código BIN. Es importante destacar que los lúmenes dados por el fabricante del LED no se obtienen con el funcionamiento habitual del componente, sino que dependen del valor de la T_j a la que va a trabajar y de las pérdidas tanto de la fuente de alimentación como de las ópticas. Trabajando el LED a la corriente típica de funcionamiento se tienen unas pérdidas del 33% sobre su flujo nominal. Es decir, si se quieren obtener 1000 Lm con LEDs que proporcionan 100Lm típicos cada uno, se deberán colocar 15 LEDs en lugar de 10 para contrarrestar las pérdidas.

El incremento del número de LEDs que se colocan a causa de las pérdidas se puede reducir aumentando los lúmenes radiados, ya que los fabricantes de LEDs garantizan la luminosidad típica durante 50.000 horas trabajando a la corriente típica, lo cual es siempre bastante menor que la máxima soportada. La degradación del LED será mayor, pero considerando que la electrónica que alimenta a estos componentes tiene una duración de 30.000 a 40.000 horas [2], por el desgaste principal de condensadores e inductancias, es posible aumentar la corriente directa del LED aumentando así los lúmenes que ofrece. Hay que tener cuidado con la no linealidad de

la corriente con el flujo luminoso, ya que se podría llegar a tener unas pérdidas de eficiencia del 20%.

Para conseguir los lúmenes deseados en la mayoría de las aplicaciones se deben conectar varios LEDs. De las dos posibilidades, en serie o en paralelo, se ha llegado a la conclusión de que la conexión en serie es la óptima, garantizando así la misma corriente directa y obteniendo el mismo flujo y brillo luminoso en todos los chips. Si existe un gran número de LEDs a conectar, se realizará conmutando la misma corriente en las diferentes ramas a una frecuencia superior a la que el ojo humano es capaz de captar.

Se ha llegado a la conclusión de que la alimentación de los LEDs se realiza con una corriente constante por estar conectados en serie. La limitación de la corriente se puede hacer con una resistencia o un regulador lineal, resultando ser los diseños menos eficientes que existen, ya que generan grandes pérdidas de energía por calor; se debe tener en cuenta que el sistema funcionará durante un largo periodo de tiempo, por lo que el valor de la eficiencia debe de ser el máximo posible y se debe de generar el mínimo calor para que no afecte al LED. Por esto, se diseña una fuente de alimentación para LEDs llamada comercialmente driver para LEDs de corriente constante. De las múltiples maneras con las que se puede producir esa corriente constante, se han seleccionado tres propuestas, siendo el convertidor AC-DC tipo flyback en modo de corriente constante y el convertidor DC-DC de corriente constante alimentado con tensión continua, las dos más usuales en el mercado de las fuentes de alimentación para LEDs. La tercera alternativa, convertidor AC-DC específico para LEDs, es un diseño más actual y debido a su reducido coste parece ser la tendencia que seguirán los fabricantes de driver para LEDs a partir de ahora. Además de generar la corriente necesaria, el dispositivo utilizado tiene integrado el corrector del factor de potencia (PFC), una protección por si algún LED se queda en cortocircuito y, según el fabricante, con bajos niveles de armónicos. Además, se ha añadido en el diseño la protección para circuito abierto. En el presente trabajo, y a modo de conclusión, se ha elegido esta tercera opción por tener un coste más reducido, una efectividad prácticamente igual a las otras dos y por las funcionalidades que ofrece como valor añadido. El diseño lo proporciona el fabricante del componente prácticamente en su totalidad, ya que el circuito integrado utilizado es de fácil configuración y tiene pocos componentes externos, siendo esto de gran ayuda para el diseñador.

Por último, y para completar la exposición del SSL, es preciso mencionar que las ópticas juegan un papel secundario pero importante en la eficiencia final del sistema ya

que, cuando se realiza un cálculo luminotécnico, se determina la cantidad de luz y la distribución necesaria para la superficie a iluminar. El momento de elegir la óptica apropiada se determina cuando se conoce la distribución que se quiere conseguir.

Una futura línea de investigación que se abre camino a raíz de lo presentado en este proyecto sería la realización de la simulación y funcionalidad de cada una de las fuentes de alimentación alternativas mencionadas para mejorar el sistema.

Referencias

- [1] Monica Hansen. *LED Lighting: More energy-efficient than CFL?* [Online]. CREE. Agosto 2009.
- [2] Arrow Electronics. "Arrow Lighting Solutions Seminar". Madrid. 1 Junio 2011.
- [3] Documento CLD-AP37 REV 1 de CREE. (2011, 26 de abril). *Optimizing PCB Thermal Performance for Cree XLamp LEDs*. Disponible: http://www.cree.com/products/pdf/XLamp_PCB_Thermal.pdf
- [4] Catálogo virtual de Philips. (Mayo 2011). *LED spotlight module*. Disponible: http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/331580/fortimo_led_slm_module_331580_ffs_esp.pdf
- [5] Documento CLD-AP5.000 de CREE. (Junio de 2011). *LED Luminaire Design Guide*. Disponible: http://www.cree.com/products/pdf/LED_Luminaire_Design_Guide.pdf
- [6] Linear Technology. (Mayo 2011). *Datasheet del circuito integrado LT3799*. Disponible: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3799f.pdf>
- [7] CREE. (Julio 2011). *Datasheet XLamp, XP-G.Documento CLD-DS33 Rev 2*. Disponible: www.cree.com/products/pdf/XLampXP-G.pdf
- [8] Documento CLD-AP60 rev 0 de CREE. (Julio 2011). *Pulsed Over-Current Driving of XLamp LEDs:Information and Cautions*. Disponible: <http://www.cree.com/products/pdf/XLamp-Pulsed-Current.pdf>

Figuras no realizadas por el autor del trabajo:

- Figura 1:

Aria San (mayo 2011). El Binning o la dispersión del color entre lámparas del mismo lote de producción. Disponible: <http://www.grinium.com/2011/05/criterio-de-eleccion-6-el-binning-la-dispersion-del-color-entre-lamparas-del-mismo-lote-de-produccion/>

- Figuras 2 y 5:

Lumileds Philips (febrero 2011) *Play Solutions Guide by Future Lighting Solutions*.Disponible: <http://www.philipslumileds.com/support/documentation/guides-and-brochures>

- Figuras 3 y 4:

CREE. (Junio 2011). *Datasheet del diodo LED de potencia XLamp XP-G. Documento CLD-DS20 REV 4*. Disponible: www.cree.com/products/pdf/XLampXP-G.pdf

- Figuras 6, 7 y 8:

Documento CLD-AP37 REV 1. CREE. (2011, 26 de abril). *Optimizing PCB Thermal Performance for Cree XLamp LEDs*. Disponible: descargada desde la website: http://www.cree.com/products/pdf/XLamp_PCB_Thermal.pdf

- Figura 9:

Fischer- Elektronik. Julio 2011.

Disponible: www.fischerelektronik.de/index.php/heatsinks-for-leds?&L=

- Figura 10:

Carclo – Optics. Julio 2011.

Disponible: www.carclo-optics.com/latest_products.html#streetLamp

Consultas:

- La mayoría de las referencias de los principales fabricantes de LEDs: Lumileds (www.philipslumileds.com), OSRAM (www.osram.com/osram_com/LED), CREE (www.cree.com) y SEOUL (www.acriche.com/en/).
- Referencias, software de diseño e información de los fabricantes de semiconductores: Power Integrations (www.powerint.com), National Semiconductor (www.national.com), Linear Technology (www.linear.com), Fairchild (www.fairchildsemi.com), MPS (www.monolithicpower.com).
- R. W. Erickson, Dragan Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics*. Segunda edición. 2004.
- Magnetics. *Catálogo Powder Cores*. 2008.
- Konek. *Electrolytic capacitors*. 2006.

Anexo I: Diseño de la fuente de corriente constante AC-DC tipo flyback para LED

El diseño se ha realizado con la herramienta PowerIntegrations Expert 8.0 con los parámetros siguientes:

Tensión de entrada: 230V – 50Hz

Salida: 21 V – 1A

Uso de “bias” en el transformador y específico para LEDs, siendo el funcionamiento una salida de corriente constante.

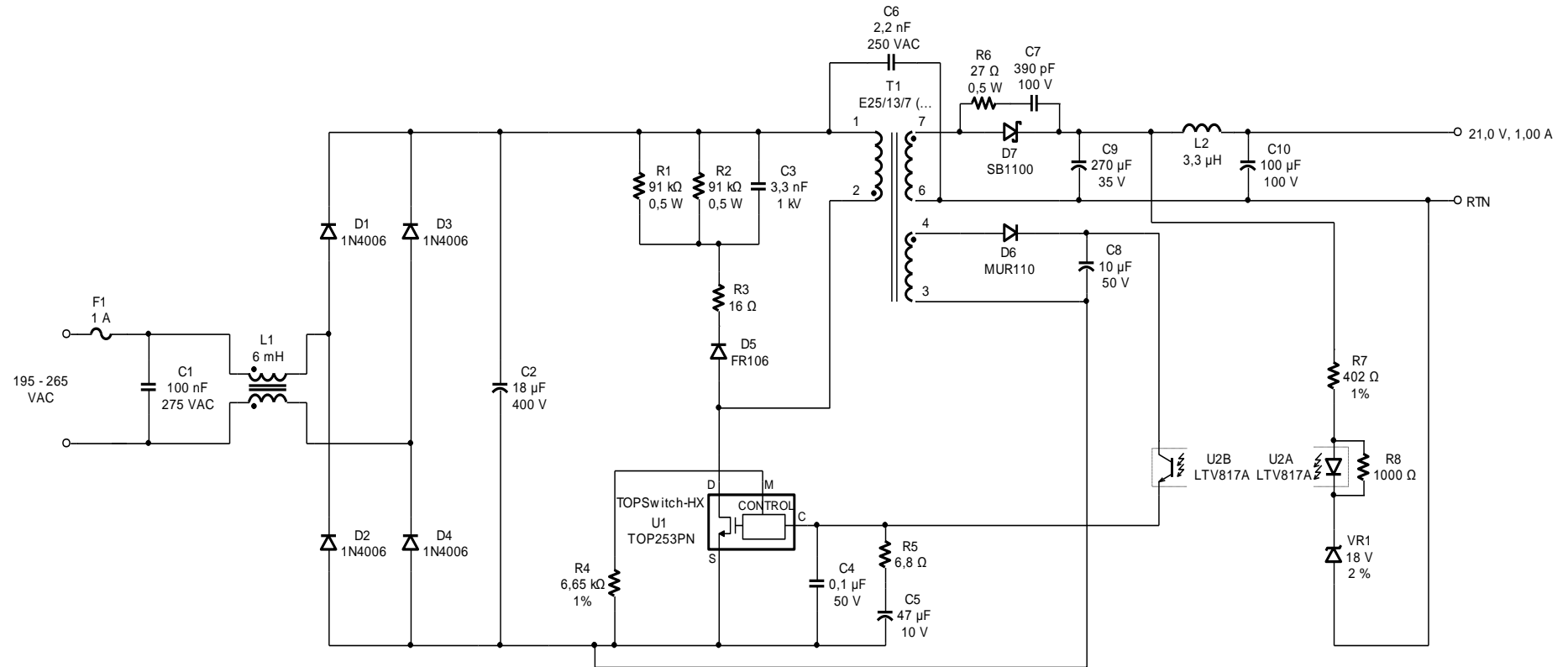
El esquema eléctrico y construcción del transformador que ha dado el programa se muestran en las próximas páginas. El coste de los materiales excluida la placa de circuito impreso son los siguientes:

<u>Descripción</u>	<u>Unidades</u>	<u>Coste unidad*</u>	<u>Total*</u>
Puente diodos SMD	1	0,055	0,055
Resistencias SMD 1%	8	0,0099	0,095
Condensadores multicapa bajo coste (1)	3	0,0097	0,0291
Condensadores multicapa alto coste (2)	4	0,18	0,72
Condensadores electrolítico bajo coste (1)	2	0,02	0,04
Condensadores electrolítico alto coste (2)	4	0,075	0,25
Diodos fast SMD	2	0,15	0,30
Diodo Schottky 60V 5A	1	0,15	0,15
Bobina choque modo común 6mH, 0,7A	1	0,85	0,85
Bobina radial 3,3 μ H, 5,5 A	1	0,25	0,25
Trafo núcleo ferrita tipo flyback tipo EF25	1	0,55	1,1
TOPSwitch TOP253PN de Power Integration	1	1,5	1,5
Optotransistor	1	0,05	0,05
<u>TOTAL</u>			<u>5,38€</u>

(1) Multicapa máximo 100V SMD. Electrolítico 105°C máximo 63V

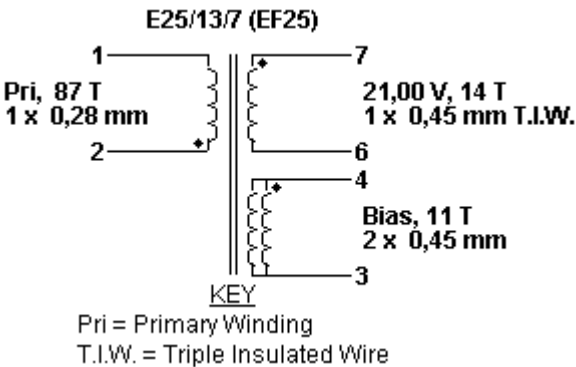
(2) Multicapa máximo 400V o tipo X1-Y1. Electrolítico 105°C máximo 400V SMD

* Precio en € con el dólar a 1,42€, para 5.000 piezas al año.

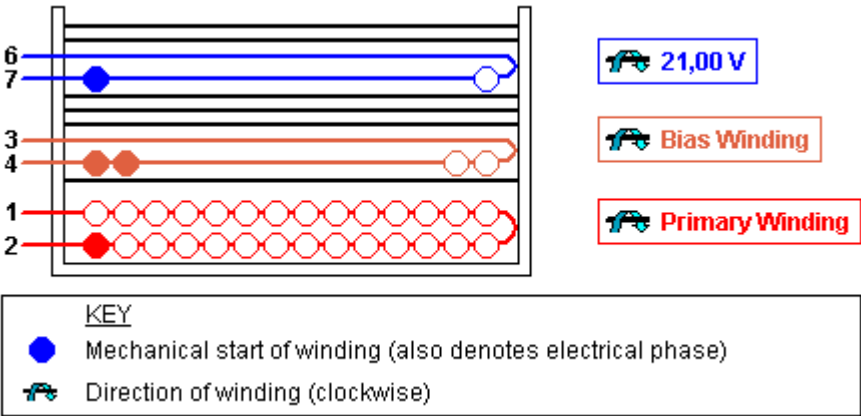
Esquema eléctrico básico:

Especificaciones para la construcción del transformador T1:

Electrical Diagram



Mechanical Diagram



Winding Instruction

Primary Winding

Start on pin(s) 2 and wind 87 turns (x 1 filar) of item [5] in 2 layer(s) from left to right. At the end of 1st layer, continue to wind the next layer from right to left. On the final layer, spread the winding evenly across entire bobbin. Finish this winding on pin(s) 1.

Add 1 layer of tape, item [3], for insulation.

Bias Winding

Start on pin(s) 4 and wind 11 turns (x 2 filar) of item [6]. Wind in same rotational direction as primary winding. Spread the winding evenly across entire bobbin. Finish this winding on pin(s) 3.

Add 3 layers of tape, item [3], for insulation.

Secondary Winding

Start on pin(s) 7 and wind 14 turns (x 1 filar) of item [7]. Spread the winding evenly across entire bobbin. Wind in same rotational direction as primary winding. Finish this winding on pin(s) 6.

Add 2 layers of tape, item [3], for insulation.

Core Assembly

Assemble and secure core halves. Item [1].

Varnish

Dip varnish uniformly in item [4]. Do not vacuum impregnate.

Comments

1. For non margin wound transformers use triple insulated wire for all secondary windings.

Materials

Item	Description
[1]	Core: E25/13/7 (EF25), NC-2H (Nicera) or Equivalent, gapped for ALG of 258 nH/t ²
[2]	Bobbin: Generic, 5 pri. + 5 sec.
[3]	Barrier Tape: Polyester film [1 mil (25 µm) base thickness], 15,30 mm wide
[5]	Varnish
[5]	Magnet Wire: 0,28 mm, Solderable Double Coated
[6]	Magnet Wire: 0,45 mm, Solderable Double Coated
[7]	Triple Insulated Wire: 0,45 mm

Electrical Test Specifications

Parameter	Condition	Spec
Electrical Strength, VAC	60 Hz 1 second, from pins 1,2,3,4 to pins 6,7.	3000
Nominal Primary Inductance, μ H	Measured at 1 V pk-pk, typical switching frequency, between pin 1 to pin 2, with all other Windings open.	2141
Tolerance, $\pm\%$	Tolerance of Primary Inductance	10,0
Maximum Primary Leakage, μ H	Measured between Pin 1 to Pin 2, with all other Windings shorted.	64,2

Although the design of the software considered safety guidelines, it is the user's responsibility to ensure that the user's power supply design meets all applicable safety requirements of user's product.

The products and applications illustrated herein (including circuits external to the products and transformer construction) may be covered by one or more U.S. and foreign patents or potentially by pending U.S. and foreign patent applications assigned to Power Integrations. A complete list of Power Integrations' patents may be found at www.powerint.com.

Anexo II: Diseño del driver DC-DC de corriente constante alimentado con tensión continua

El diseño del driver DC-DC se ha realizado con la herramienta Webench Design de National Semiconductor con los parámetros siguientes:

Tensión de entrada: entre 24 y 26 V

Salida: 21 V – 1A para conectar 6 LEDs de $I_F = 1\text{A}$ y $V_F = 3,5\text{V}$.

El esquema eléctrico que ha dado el programa se muestra en la próxima página.

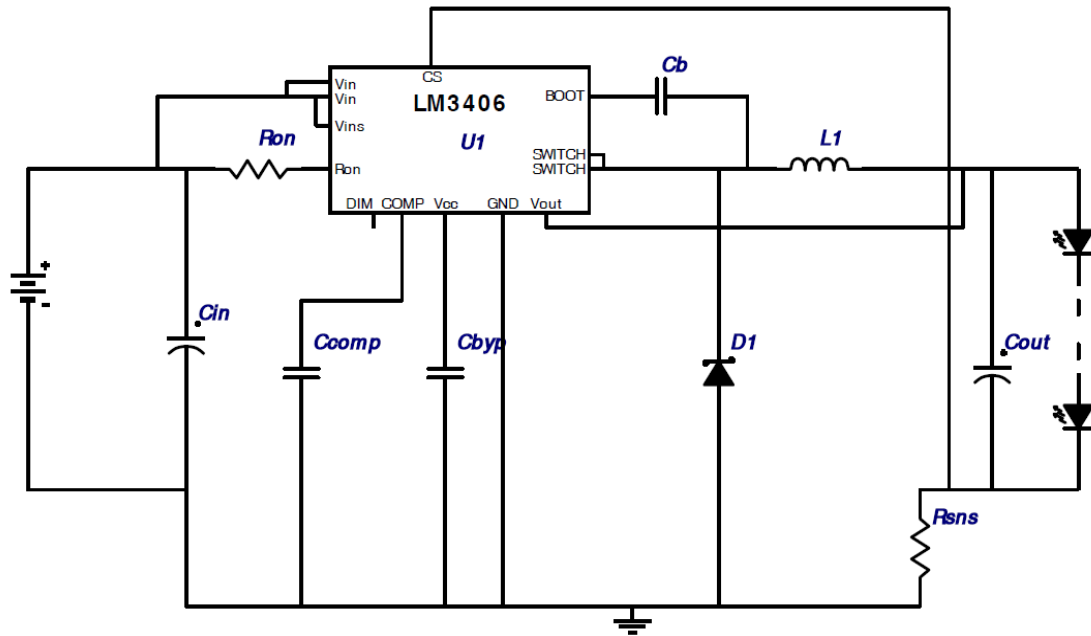
El coste de los materiales excluida la placa de circuito impreso son los siguientes:

<u>Descripción</u>	<u>Unidades</u>	<u>Coste unidad*</u>	<u>Total*</u>
Resistencias SMD 1%	2	0,0099	0,0198
Condensadores multicapa bajo coste (1)	3	0,0097	0,0291
Condensadores electrolítico bajo coste (1)	2	0,02	0,04
Diodo Schottky B140-13-F	1	0,05	0,05
Bobina radial 47 μH , 3 A	1	0,15	0,15
LM3406 1.5A Buck LED driver PSOP	1	1,12	1,12
<i>Total driver DC-DC</i>			<i>1,40</i>
<i>TOTAL conjunto flyback y driver DC-DC</i>		<i>4,68+1,40</i>	<i>6,08</i>

(1) Multicapa máximo 100V SMD. Electrolítico 105°C máximo 63V

(2) Multicapa máximo 400V o tipo X1-Y1. Electrolítico 105°C máximo 400V SMD

* Precio en € con el dólar a 1,42€, para 5.000 piezas al año.

Esquema eléctrico:Listado de componentes:

<u>Referencia</u>	<u>Valor</u>
Cin	10 μ F / 63V
Ccomp, Cbyp	100 nF / 25V
Cb	22 nF / 63V
Cout	1 μ F / 50V
Ron	412K 1/4W 1%
Rsns	220 Ω 1/4W 1%
L1	47 μ H 3A
D1	B140-13-F
U1	LM3406MH

Anexo III: Diseño del convertidor AC-DC específico para LEDs

El diseño del convertidor lo proporciona el fabricante precisamente para las características que tenía el convertidor en la aplicación DC1595A de Linear Technology de fecha marzo de 2011.

A continuación se desglosa el coste total de los componentes, sin la placa de circuito impreso como en los casos anteriores:

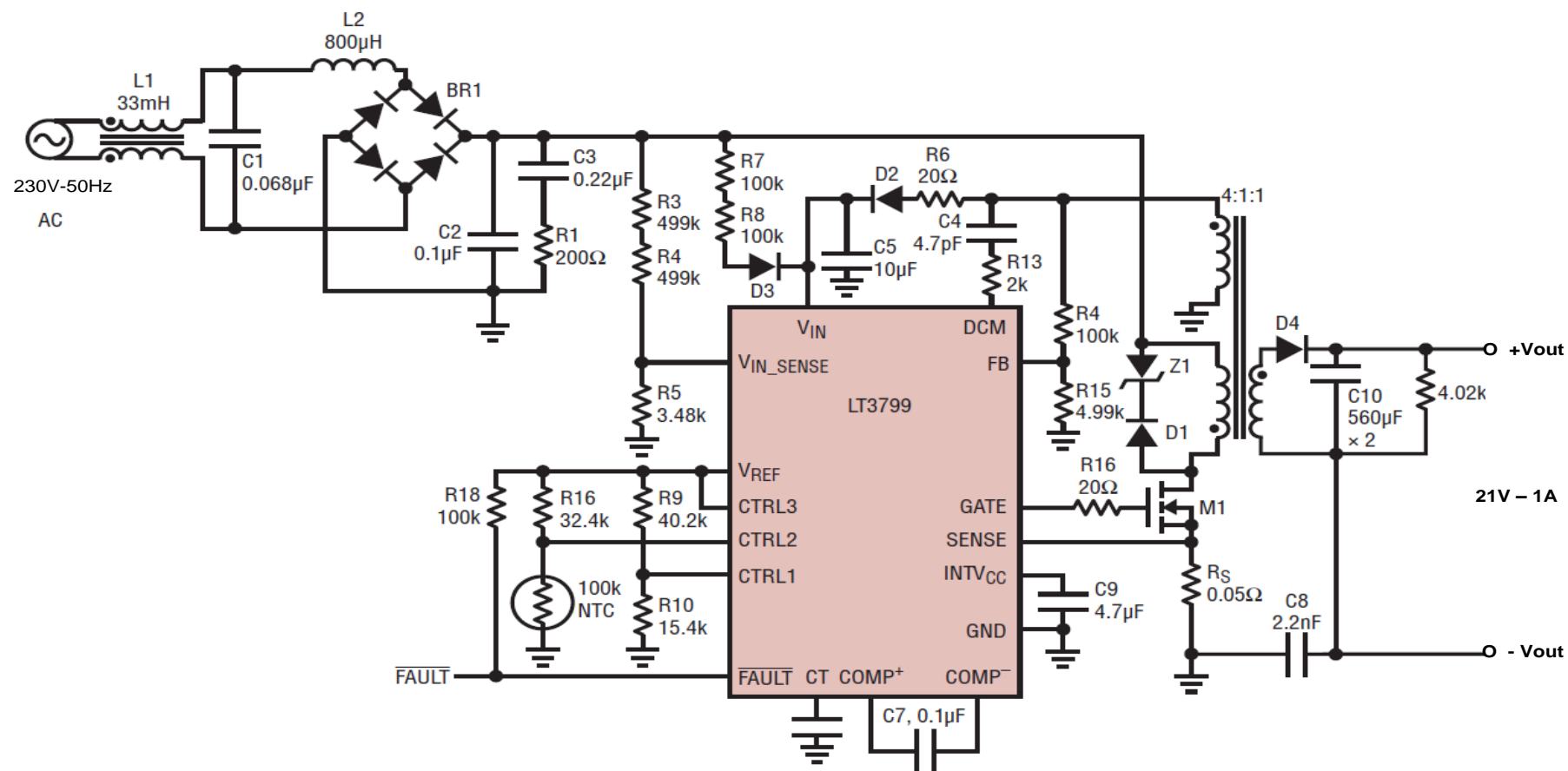
<u>Descripción</u>	<u>Unidades</u>	<u>Precio unidad*</u>	<u>Total*</u>
Puente diodos SMD	1	0,055	0,055
Resistencia SMD sensora	1	0,05	0,05
Resistencias SMD 1%	17	0,0099	0,1683
Condensadores multicapa bajo coste (1)	2	0,0097	0,0194
Condensadores multicapa alto coste (2)	2	0,09	0,18
Condensadores electrolítico bajo coste (1)	2	0,02	0,04
Condensadores electrolítico alto coste (2)	2	0,075	0,15
Diodos fast SMD	3	0,05	0,15
Diodo 150V 1A (Z1)	1	0,05	0,05
Bobina choque modo común 33mH, 0,3A	1	0,25	0,25
Bobina toroide 750 μ H, hilo 0,15mm, 250mA (AC)	1	0,3	0,3
Mosfet N 650V, 15A FDP15N65(Fairchild) – M1	1	0,8	0,8
Trafo núcleo ferrita tipo flyback tipo EE20	1	0,35	0,55
LED Driver LT3799	1	1,9	1,9
<u>TOTAL</u>			<u>4,662€</u>

(1) Multicapa máximo 100V SMD. Electrolítico 105°C máximo 63V

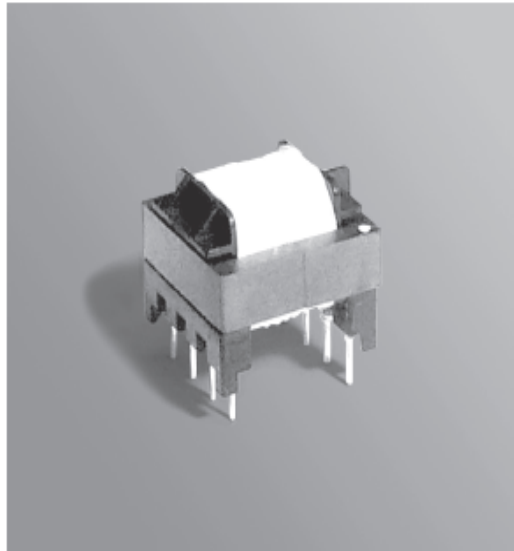
(2) Multicapa máximo 400V o tipo X1-Y1. Electrolítico 105°C máximo 400V SMD

* Precio en € con el dólar a 1,42€, para 5.000 piezas al año.

En las siguientes hojas se muestran el esquema eléctrico y los datos para la construcción del transformador. Estos ficheros se han descargado a fecha de 09/05/2011 en la website: <http://www.linear.com/product/LT3799>.

Esquema eléctrico:

Plano del transformador del convertidor (4:1:1):



- Developed for Linear Technology for use with their LT3799 Isolated LED Controller with active power factor correction
- Mounted on LT3799 Demo Board
- Universal input; 24 Watt output
- Isolation: 3000 Vrms primary to secondary;
500 Vrms primary to bias and all windings to core

Core material Ferrite

Terminations RoHS compliant tin-silver over tin over copper. Other terminations available at additional cost.

Weight 13.9 g

Ambient temperature -40°C to +85°C

Storage temperature Component: -40°C to +85°C.

Packaging: -40°C to +80°C

Moisture Sensitivity Level (MSL) 1 (unlimited floor life at <30°C / 85% relative humidity)

Failures in Time (FIT) / Mean Time Between Failures (MTBF)
38 per billion hours / 26,315,789 hours, calculated per Telcordia SR-332

Packaging 100 per tray

PCB washing Only pure water or alcohol recommended

Part number	Inductance at 0 A ¹ ±10% (μH)	Inductance min at I _{pk} ² (μH)	DCR max (Ohms)	Leakage inductance max (μH) ³	Turns ratio		I _{pk} ² (A)	Output ⁴
					Pri : Sec	Pri : Bias		
JA4429-AL	400	340	0.252 (Pri) 0.126 (Sec) 0.149 (Bias)	7.5	1:0.24	1:0.24	1.3	24 V, 1.0 A

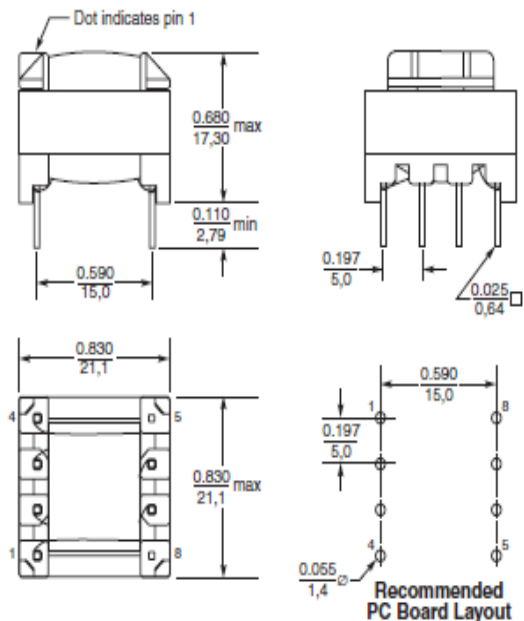
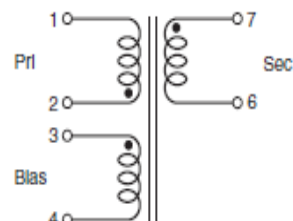
1. Inductance measured at 100 kHz, 0.1 Vrms, 0 Adc using an Agilent/ HP 4263B impedance analyzer or equivalent.

2. Peak primary current drawn at minimum input voltage.

3. Leakage inductance is for the primary and is measured with the secondary shorted.

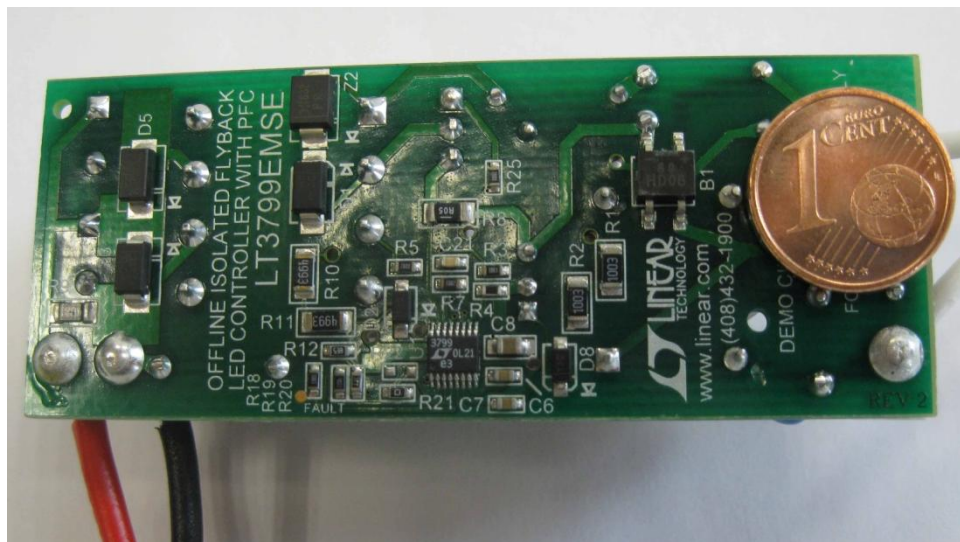
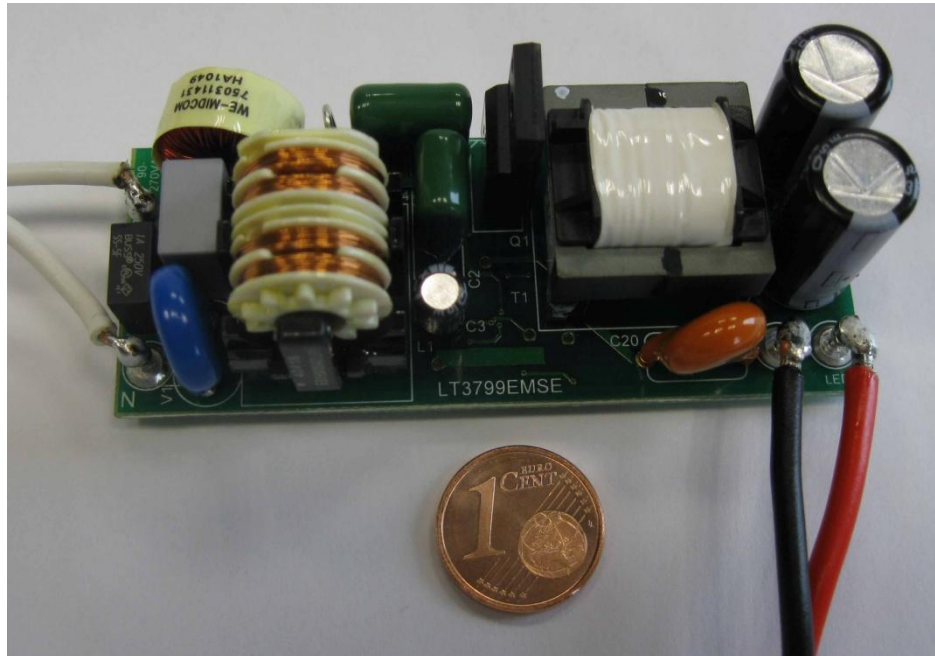
4. Output is for the secondary. Bias winding output is 24 V, 20 mA.

5. Electrical specifications at 25°C.



Dimensions are in $\frac{\text{inches}}{\text{mm}}$

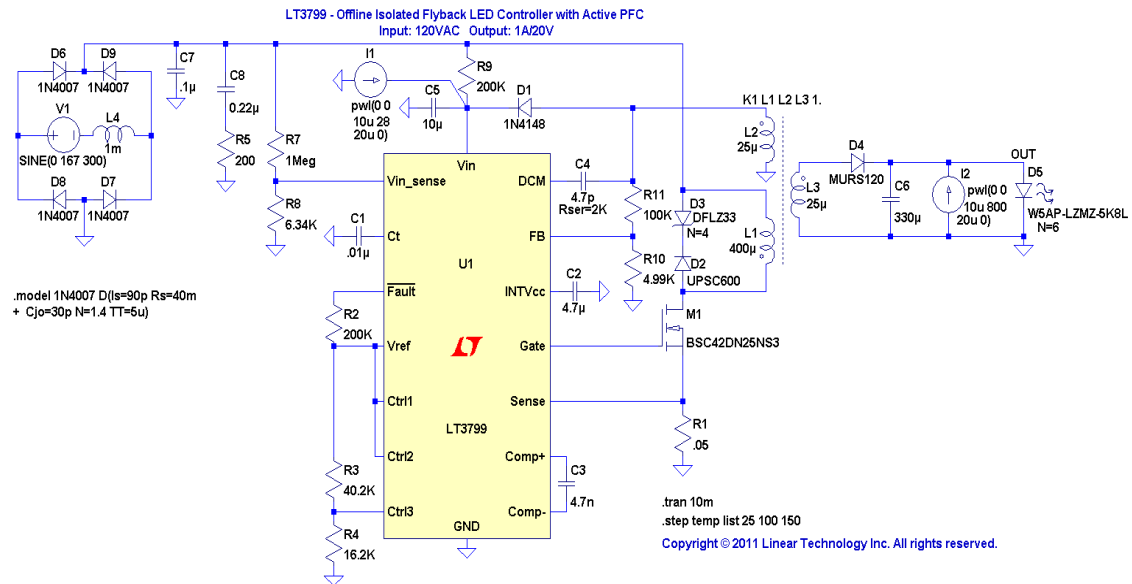
Imágenes de la placa de evaluación LT3799EMSE de Linear Technology del driver específico para LEDs de 21V / 1A, medidas (73mmx30mm), 27mm altura:



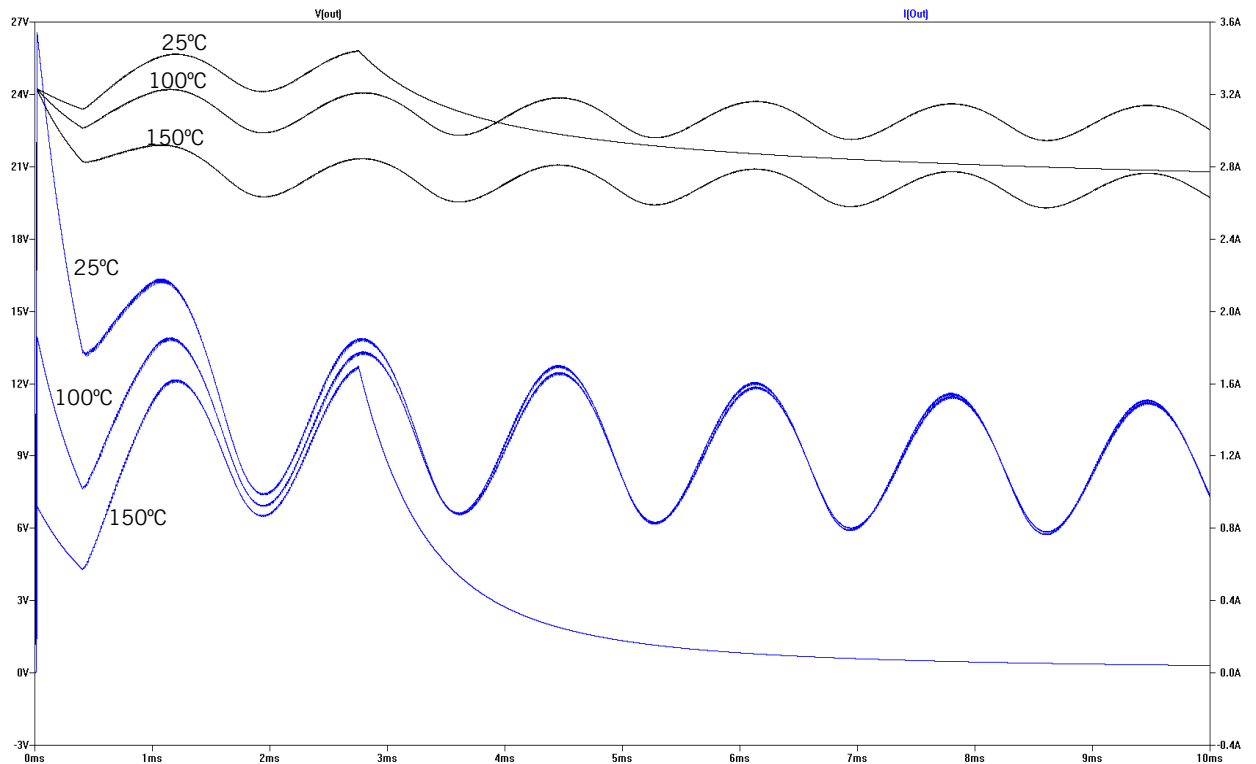
Resultados de la simulación con LTSpice:

El análisis se ha realizado frente a variaciones de la temperatura (25°, 100° y 150°C), excepto la señal de tensión y corriente de entrada:

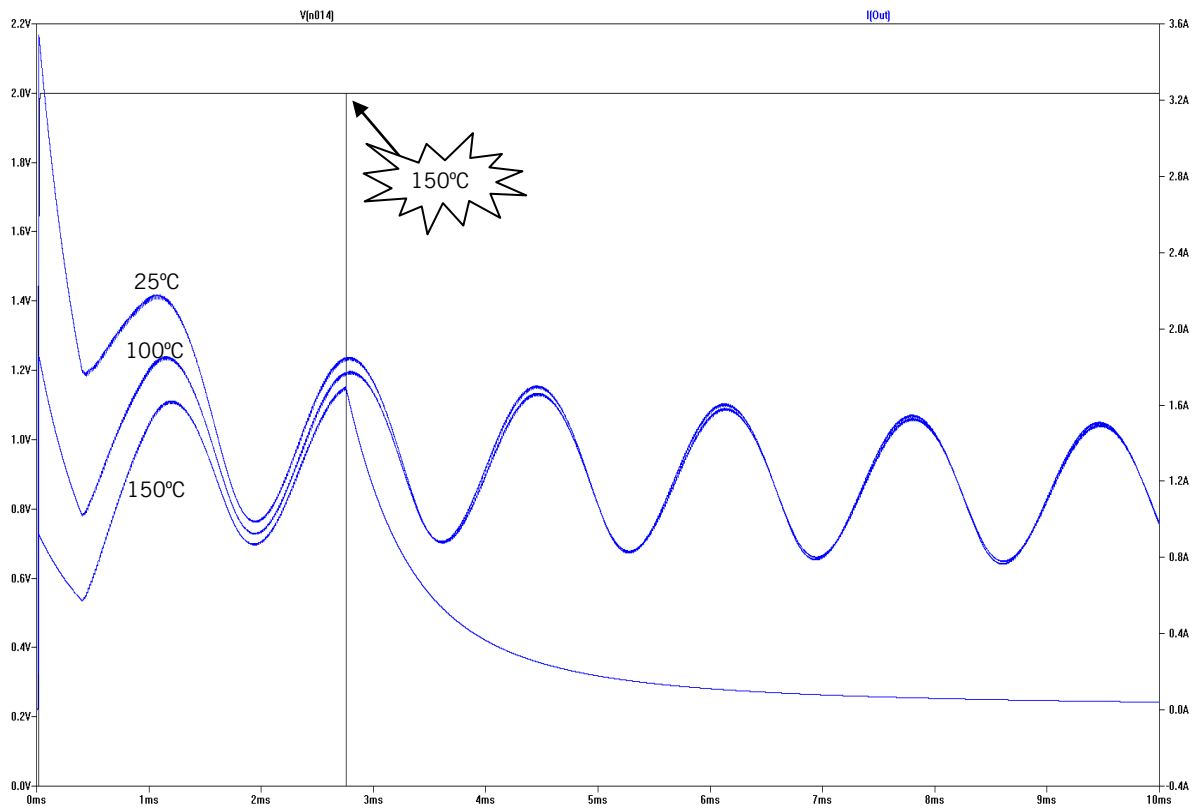
Circuito:



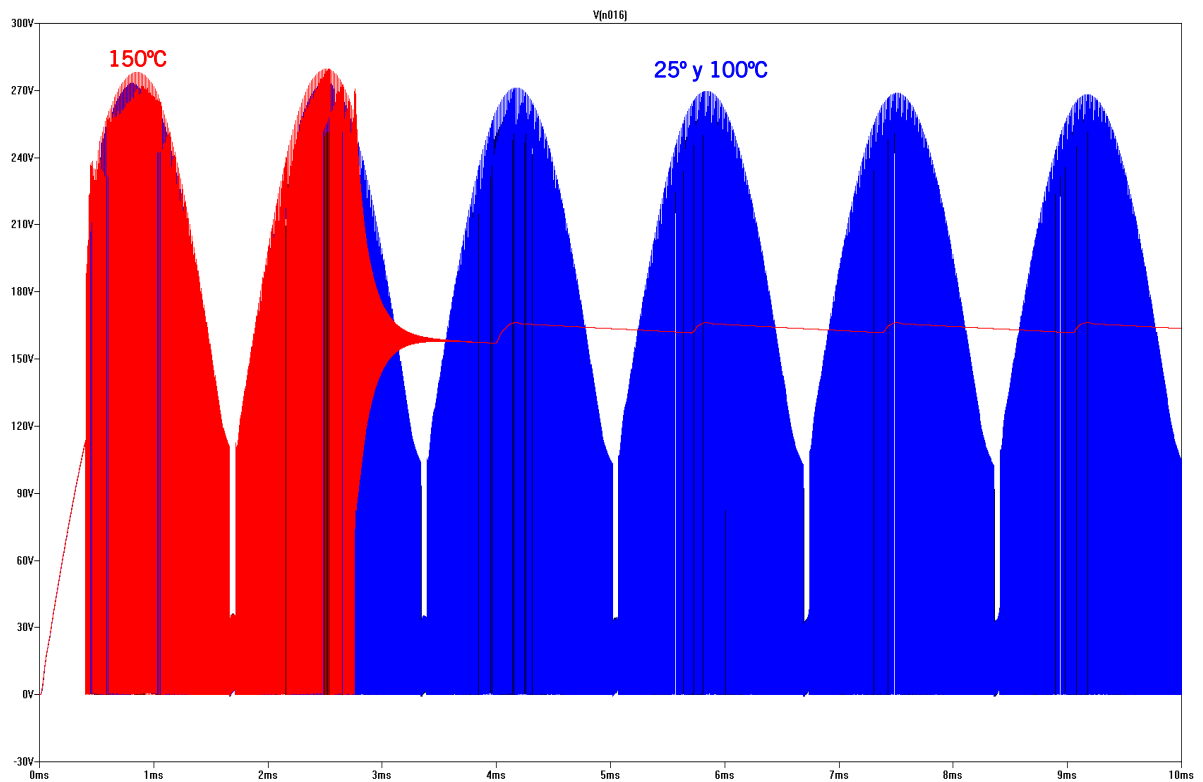
Tensión y corriente de salida, en los LEDs de potencia ($A = 3V/div$ y $0,4A/d$) ($t = 1ms/d$):



Corriente de salida(Iout), tensión pin Fault(Vn014) (A=0,2V/div y 0,4A/d) (t=1msg/div):



Tensión terminales MOS (Transistor M1) A= 30V/div - t=1msg/div):



Tensión entrada y corriente de entrada ($A=20V/div$ y $100mA/div$) - $t=1ms/div$:

